

Antti Järvinen

M1-luokan ajoneuvon jarrujärjestelmän suunnittelu

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Insinööri (AMK)
Auto ja kuljetustekniikka
Insinöörityö
27.4.2012



ALKULAUSE

Tämän insinööriyön aiheena oli M1-luokan ajoneuvon jarrujärjestelmän suunnittelu, mitoittaminen ja testaus. Aiheen ja työkalut insinööriyön kirjoittamiseen tarjosi Uudessakaupungissa toimiva Suomen ainoa autotehdas Valmet Automotive Inc., ja työ suoritettiin Valmet Automotiven tuotekehityskeskukseen tiloissa alkuvuodesta 2012.

Haluan kiittää erityisesti Valmet Automotiven tuotekehityskeskukseen työntekijöitä, joista työn ohjaajina toimivat Risto Sarakaski ja Jukka-Pekka Multasuo. Lisäksi kiitoksen ansaitsee Pasi Oikarinen, joka toimi työn ohjaajana Metropolia Ammattikorkeakoulun puolesta.

Uudessakaupungissa 27. huhtikuuta 2012

Antti Järvinen

Tekijä(t) Otsikko	Antti Järvinen M1-luokan ajoneuvon jarrujärjestelmän suunnittelu
Sivumäärä Aika	105 sivua + 1 liite 27.4.2012
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Auto- ja kuljetustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tuotetekniikka
Ohjaaja(t)	Suunnitteluinsinööri Jukka-Pekka Multasuo Tuntiopettaja Pasi Oikarinen
<p>Tämä insinöörityö käsittelee M1-luokan ajoneuvon jarrujärjestelmän suunnittelua ja komponenttien mitoittamista. Insinöörityön tarkoituksena on selvittää mihin turvallisen ja suorituskkyisen jarrujärjestelmän suunnittelu perustuu, sekä miten auton ominaisuudet ja kuluttajan tottumukset vaikuttavat suunnitteluun.</p> <p>Insinöörityö käsittelee aluksi M1-luokan ajoneuvon jarrujärjestelmän toimintaa, merkitystä ja vaatimuksia. Tämän jälkeen siirrytään kuvaamaan jarrujärjestelmän mitoitusprosessia ja suunnittelua sekä siihen vaikuttavia tekijöiden huomioon ottamista. Lisäksi esitellään tapoja testata ja mitata jarrujärjestelmän toimintaa ja suorituskkyä. Lukijalle esitellään myös jarrujärjestelmän käytännön mitoitus-esimerkki, jossa tarkastellaan jo olemassa olevan auton jarrujärjestelmän eri komponenttien mitoitusperiaatteet. Mitoitus-esimerkissä aloitetaan jarrupolkimen mitoitusperiaatteesta ja päädytään esittelemään jarrujärjestelmän tuottamaa teoreettista suorituskkyä. Viimeiseksi esitellään mitoitus-esimerkissä käytetyn auton jarrujärjestelmän teoreettista suorituskkyä ja ominaisuuksia, sekä verrataan niitä todellisissa mittauksissa saatuihin tuloksiin.</p> <p>Päätavoitteena insinöörityössä oli tarkastella henkilöauton jarrujärjestelmän suunnittelua ja komponenttien mitoittamista sekä sitä, miten eri autojen jarrujärjestelmien ominaisuuksia ja suorituskkyä voidaan mitata niin teoreettisella kuin käytännön tasolla. Insinöörityössä suoritettut käytännön mittaukset osoittivat, että jarrujärjestelmän suorituskkyyn ja ominaisuuksien arviointi teoreettisella tasolla osoittautui hyvin lähelle todellisuutta. Insinöörityössä tehtiin myös jarrutustuntumamittaus eri autoille, ja mittauksen avulla selvisi selvä trendi eri autojen jarrutustuntumassa.</p> <p>Lopputuloksena syntyi insinöörityö, jonka avulla lukija saa kuvan siitä, mihin jarrujärjestelmän suunnittelu ja komponenttivalinnat perustuvat sekä mikä tekee jarrujärjestelmästä suorituskkyisen ja turvallisen. Tämä insinöörityö voi olla apuna, niin opiskelijoille, suunnittelutyössä toimiville kuin autoharrastajille.</p>	
Avainsanat	jarrujärjestelmä, poljinvoima, painopiste, hidastuvuus

Author(s) Title	Antti Järvinen Design Principles of M1-class Vehicle Brake System
Number of Pages Date	105 pages + 1 appendices 27 April 2012
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive and Transport Engineering
Specialisation option	Automotive Design
Instructor(s)	Jukka-Pekka Multasuo, Design Engineer Pasi Oikarinen, Senior Lecturer
<p>This Bachelor's thesis provides information on how to design a safe brake system for an M1-class vehicle. The main objective was to examine how a safe and efficient brake system is designed and what kind of an effect vehicle features and consumer habits have on the design process.</p> <p>The study starts with covering the basic function, importance and demands for a modern brake system. Then the brake system design and component sizing are discussed. Furthermore, all the factors having an influence on the brake system are also taken under discussion. The study also introduces a component sizing example where a brake system of a modern M1-class vehicle is taken in to study. The study provides information as how to choose the theoretically right components for a brake system and what kind of theoretical characteristics and performance it can produce. Finally the vehicle used as an example went through tests where the real characteristics and performance was measured.</p> <p>The main objective of the thesis was to offer the basic principles how a modern M1-class vehicle brake system is designed and how to choose the right brake components. When the comparison between the theoretical and real characteristics and performance were done, the results were very close to each other. This proves that with accurate initial data, a realistic theoretical outcome can be expected. To measure the braking feel of different vehicles, the test was done to 7 different cars. The results of the test show a clear trend in vehicle deceleration as a function of brake pedal force.</p> <p>The outcome is a thesis which provides an understanding of the facts on which brake system design and component sizing are based and which make the brake system efficient and safe to use. The thesis can provide help for students, design engineers and car enthusiasts.</p>	
Keywords	brake system, braking, deceleration, pedal force

Sisällys

1	Johdanto	1
1.1	Tavoitteet ja toteutus	1
1.2	Valmet Automotive Inc.	1
1.3	Tausta	2
2	Jarrujärjestelmä M1-luokan ajoneuvossa	2
2.1	Jarrujärjestelmän merkitys ja vaatimukset	2
2.2	Jarrujärjestelmien päätyypit	3
2.3	Jarrujärjestelmän toiminta	3
2.3.1	Toimintaperiaate	4
2.3.2	Jarrutustapahtuma	5
2.4	Jarrujärjestelmän toimintavarmuus ja turvallisuus	7
2.5	Lain asettamat vaatimukset jarrujärjestelmälle	8
2.5.1	Kitkakäyrä	8
2.5.2	Käyttöjarru	9
2.5.3	Käyttöjarrun teho	10
2.5.4	Käyttöjarrun jäännösteho	11
2.5.5	Varajarrujärjestelmä	12
2.5.6	Seisontajarru	12
2.6	Jarrujärjestelmän toimintaviiveet	13
2.6.1	Aktivointiviive	14
2.6.2	Vapautusviive	16
2.7	Kitkan muodostuksen mekanismit tienpinnan ja renkaan välillä	16
2.7.1	Kitkan muodostumisen periaate	16
2.7.2	Pitkittäisvoiman muodostuminen	18
2.8	Jarruvoiman säätölaitteet	20
2.8.1	ABS - jarrujen lukkiutumisenestojärjestelmä	20
2.8.2	Takajarruvoiman säätölaite	20
2.9	Jarrujärjestelmä M1-luokan sähköajoneuvossa	22
2.9.1	Sähköauton asettamat vaatimukset jarrujärjestelmälle	22
2.9.2	Energian talteenotto	22
2.9.3	Perinteisen jarrujärjestelmän ja energian talteenoton yhdistäminen	23
2.10	Jarrujärjestelmien eroavaisuudet	26

2.10.1	Jarrujärjestelmä keskivertokuluttajalle	26
2.10.2	Imago ja markkinointi	27
2.10.3	Henkilöauto (Volkswagen Golf 1.2TSI vm. 2011)	27
2.10.4	Urheiluauto (Porsche 911 Carrera S vm. 2011)	28
2.10.5	Maastoauto (Land Rover Discovery 3.0TD vm. 2011)	29
2.10.6	Hyötyajoneuvo (VW Transportter 2.0TDI vm. 2011)	30
2.10.7	Hybridi / GT-auto (Fisker Karma vm. 2011)	30
2.10.8	Jarrujärjestelmän tehokkuus suhteessa auton painoon	32
2.11	Kitkaherkkyys	34
2.12	Jarruäänet	35
2.12.1	Jarruäänien syntyminen	35
2.12.2	Jarruäänityypit	35
2.13	Jarrujen häipymisilmiö	37
3	Jarrujärjestelmän mitoitusprosessi	38
3.1	Jarrujärjestelmän suunnittelu	38
3.2	Kuluttajan toivomukset jarrujärjestelmän suhteen	40
3.3	Mitoitusprosessi	44
3.3.1	Käyttöjarrun komponenttien teholliset mitat	45
3.3.2	Käyttöjarrun kitkapintojen käyttöikä	46
3.3.3	Seisontajarrun komponenttien teholliset mitat	47
3.3.4	Pyöräjarrun lämpötilamuutokset	48
3.4	Auton ominaisuuksien vaikutus mitoittamiseen	50
3.5	Auton pakkauksen vaikutus jarrujärjestelmän suorituskykyyn	50
3.5.1	Massahitausmomentti	51
3.5.2	Auton massa	52
3.5.3	Painopisteen sijainti	54
3.5.4	Rengaskoko	56
3.6	Jarrukomponenttien sijainti	56
3.7	Hallintalaitteiden sijainti	57
3.7.1	H-piste	57
3.7.2	Mallinukke	58
3.8	Poljinvoima, polkimen liikematka ja poljintuntuma	58
3.8.1	Poljinvoima	59
3.8.2	Polkimen liikematka	59
3.8.3	Poljintuntuma	59
3.8.4	Kengän koko	60
3.9	Riskianalyysi	60

4	Jarrujärjestelmän koestus ja testaus	62
4.1	Testausprosessi	62
4.2	Painopisteen sijainti	62
4.2.1	Painopisteen sijainti auton pituussuunnassa	63
4.2.2	Painopisteen sijainti auton korkeussuunnassa	63
4.3	Jarrujärjestelmän suorituskyvyn mitta	66
4.3.1	Jarrutusvoima	66
4.3.2	Jarrutusmatka	67
4.4	Jarrutuksen stabiliteetti	67
4.5	Jarrutustuntuma	68
5	Jarrujärjestelmän mitoitus	68
5.1	Reverse engineering	68
5.2	Esimerkkiautolle asetettavat ominaisuudet ja vaatimukset	69
5.3	Komponenttien mitoitusprosessi	70
5.4	Mitoitus	70
5.4.1	Jarrupoljin	70
5.4.2	Tehostinyksikkö	71
5.4.3	Jarrupääsylinteri	75
5.4.4	Jarrupiirijako	77
5.4.5	Etujarrusatula	77
5.4.6	Takajarrusatula	78
5.4.7	Etujarrulevy	79
5.4.8	Takajarrulevy	79
5.4.9	Seisontajarru	80
5.5	Yhteen	81
5.6	Käyttöjarrun teoreettinen suorituskyky	81
5.6.1	Jarrudirektiivin 98/12/EY mukainen kitkakäyrä	82
5.6.2	Jarrutusmatka	84
5.6.3	Auton hidastuvuus jarrupoljinvoiman funktiona	84
5.6.4	Pyörivien osien massahitausmomentin vaikutus ABS-säätöön	85
5.6.5	Akselien teoreettiset jarrumomentit jarrupoljinvoiman funktiona	87
5.7	Seisontajarrun teoreettinen suorituskyky	87
5.7.1	Auton hidastuvuus seisontajarrun kahvavoiman funktiona	87
5.7.2	Auton pysyminen paikallaan mäessä seisontajarrun avulla	88
6	Jarrujärjestelmälle suorit	89

6.1	Painopisteen sijainti auton pituus-suunnassa	89
6.2	Painopisteen sijainti auton korkeus-suunnassa	90
6.3	Jarrujärjestelmän suorituskyky	90
6.4	Jarrutusmatka	91
6.5	Auton jarrutustuntuma	91
6.5.1	Mittauslaitteisto	91
6.5.2	Mittauksen lähtökohta	95
6.5.3	Mittaustulokset	96
6.5.4	Mitoitusesimerkkiauton jarrutustuntuman mittaustulokset	98
7	Yhteenveto ja päätelmät	100
7.1	Insinööriyön yhteenveto	100
7.2	Teoreettisen ja käytännön tuloksien arvioiminen	101
7.3	Jarrujärjestelmien tulevaisuus	102
	Lähteet	104
	Liitteet	
	Liite 1. Raportti mitoitusesimerkissä käytetyn auton jarrujärjestelmästä	

Lyhenteet

ABS	lukkiutumaton jarrujärjestelmä (saks. Anti Blockier System)
EBD	elektroninen takajarruvoiman säätö (eng. Electronic Brake force Distribution)
FEA	simulointitekniikka (eng. Finite Element Analysis)
G	käytetään verratessa kiihtyvyyttä maan vetovoimaan. 1 G vastaa $9,81 \text{ m/s}^2$ kiihtyvyyttä
ms	millisekunti, sekunnin sadasosa. Esimerkiksi 30 ms on 0,03 s
m/s^2	kiihtyvyys, kuvaa kappaleen nopeuden muutosta tietyssä ajassa
N	newton, voiman yksikkö, joka antaa esim. 10 kg massalle 10 m/s^2 kiihtyvyyden.
Nm	newtonmetri, voiman momentti on voiman suuruus kerrottuna sen vaikutuspisteen ja pyörimisakselin välisellä etäisyydellä

1 Johdanto

1.1 Tavoitteet ja toteutus

Uudessakaupungissa toimiva Valmet Automotive Inc. tarjosi mahdollisuutta tehdä insinööriyön henkilöautojen jarrujärjestelmien suunnittelusta. Insinööriyön tavoitteeksi asetettiin jarrujärjestelmälle asetettujen vaatimuksia tutkiminen M1-luokan ajoneuvossa niin nykypäivänä, kuin tulevaisuudessa. Pää tavoitteena tässä insinööriyössä oli tarkastella henkilöauton jarrujärjestelmän suunnittelua ja komponenttien mitoittamista sekä sitä, miten eri autojen jarrujärjestelmien ominaisuuksia ja suorituskkyä voidaan mitata niin teoreettisella kuin käytännön tasolla.

Insinööriyössä tutustutaan aluksi jarrujärjestelmien teoriaan ja toiminnallisuuteen, sekä lain asettamiin vaatimuksiin. Tämän jälkeen siirrytään kuvaamaan jarrujärjestelmän mitoitusprosessia ja suunnittelua, sekä siihen vaikuttavia tekijöiden huomioonottamista. Lisäksi esitellään tapoja testata ja mitata jarrujärjestelmän toimintaa ja suorituskkyä. Lukijalle esitellään myös jarrujärjestelmän mitoitus esimerkki, jossa kaikkien jarrukomponenttien mitoittaminen käydään läpi. Lopuksi esitellään mitoitus esimerkissä käytetyn auton jarrujärjestelmän teoreettista suorituskkyä ja ominaisuuksia, sekä verrataan niitä todellisissa mittauksissa saatuihin tuloksiin.

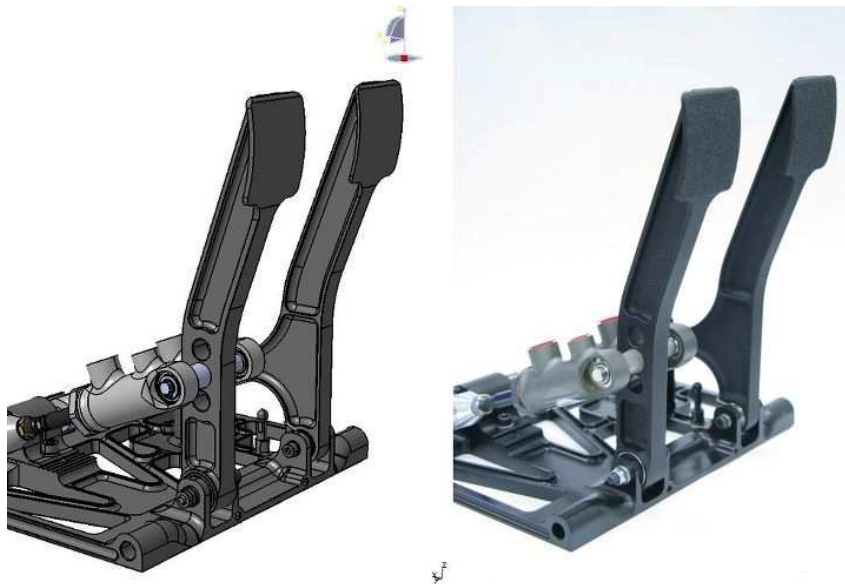
Työn lopussa esitellään myös jarrutustuntumamittaus, jossa mitattiin seitsemän erilaisen auton jarrutustuntumaa ja tehtiin mittauksista yhteenveto. Tuloksista selviää että eri autojen välillä on jarrutustuntumassa selvä trendi.

1.2 Valmet Automotive Inc.

Metso Oyj:n tytäryhtiö Valmet Automotive on tätä insinööriyötä kirjoittaessa Suomen ainoa tehdas, joka valmistaa henkilöautoja. Tuotanto on aloitettu v. 1968 ja sen jälkeen linjastosta on rullannut ulos mm. Porscheja, Saabeja, Talboteja, Opeleita ja Ladoja. Tällä hetkellä Valmet Automotiven vahvuuksia ovat sähköautojen ja muiden erikois henkilöautojen tuotanto, tuotekehitys, valmistustekniikka sekä laaja kirjo erityyppisiä liikepalveluita. Tuoreimpina saavutuksina voidaan pitää avoautojen kattomekanismien valmistustekniikkaa ja tuotantoa sekä sähköautoja kuten Fisker Karmaa.

1.3 Tausta

Olin itse Metropolia Ammattikorkeakoulun Formula Student -projektissa (Metropolia Motorsport Ry) vuosina 2009 - 2011 suunnittelemassa, valmistamassa ja kehittämässä formulatyypin kilpa-auton jarrujärjestelmää (kuva 1). Jälkimmäisenä vuotena vastasin yksin koko jarrujärjestelmästä, niin suunnittelu-, valmistus- kuin kilpailukaudellakin.



Kuva 1. HPF011-formulan säädettävä poljinasetelma Catia V5 3D mallinnusohjelmassa (vas.) ja valmistettuna (oik.)

2 Jarrujärjestelmä M1-luokan ajoneuvossa

2.1 Jarrujärjestelmän merkitys ja vaatimukset

Turvallinen henkilöauton käyttö liikenteessä vaatii sen, että auton nopeutta ja kulkuunutta voidaan turvallisesti säädellä kuljettajan toimesta. Auton kiihdyttäminen ja nopeuden ylläpitäminen tapahtuu moottorilla ja hidastaminen jarrujärjestelmän avulla. Auton nopeuden hidastamisen lisäksi jarrujärjestelmän pitää myös pystyä tuottamaan tavoiteltu nopeus esimerkiksi ajettaessa alamäkeä. Viimeisimpänä vaatimuksena jarrujärjestelmälle on auton paikallaan pysyminen pysähdyksissä tai pysäköitäessä.

Jarrujärjestelmän toiminta voidaankin tiivistää kolmeen eri toimintavaatimukseen:

1. hidastaa auton liikkeen sisältäen pysähtymisen
2. tuottaa tavoitellun nopeuden ajettaessa alamäkeä
3. pitää auton paikallaan pysähdyksissä ja pysäköitynä.

2.2 Jarrujärjestelmien päätyypit

Henkilöautojen kitkajarrut voidaan jakaa pääsääntöisesti levyjarruihin ja rumpujarruihin. Ensimmäiset rumpujarrut otettiin käyttöön jo 1900-luvun alussa, mutta nykyään levyjarrut ovat melko pitkälti jo korvanneet rumpujarrut. Rumpujarruja käytetään nykypäivänä vielä joissakin henkilöautoissa taka-akselilla. [1, s. 6.]

Kitkajarrut voidaan kahteen päätyyppiin:

1. Levyjarrut: Jarrupalaa puristetaan aksiaalissuunnassa jarrulevyä vasten. Jarrulevyn suurin etu on toiminta korkeammissa käyttölämpötiloissa, koska kun jarrulevyn lämpötila nousee, niin samalla levyn paksuus kasvaa. Tämä tuntuu kuljettajalla jäykempänä ja lyhyempänä liikematkana jarrupolkimella. Toinen suuri etu on jarrupalan ja jarrulevyn sekä jarrumomentin lineaarinen suhde. Esimerkiksi 10 %:in lisäys jarrupalan kitkakertoimessa näkyy 10 %:in lisäyksenä jarrumomentissa.
2. Rumpujarrut: Jarrukenkää puristetaan radiaalisuunnassa jarrurumpua vasten. Rumpujarrun lämpötilan noustessa rummun halkaisija kasvaa ja koska kiristävä vaikutus tapahtuu rummun sisällä, tuntuu tämä kuljettajalle pidentyneenä liikematkana jarrupolkimella. Rumpujarruissa 10 %:in lisäys jarrukenkien kitkakertoimessa saattaa lisätä jarrumomenttia jopa 30 %, mikä eroaa paljon levyjarruista.

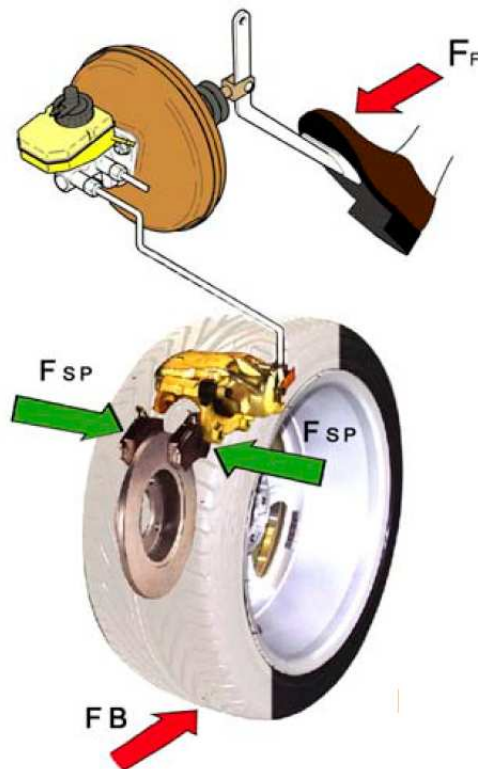
2.3 Jarrujärjestelmän toiminta

Perinteinen jarrujärjestelmä muuttaa auton liike-energian ja potentiaalienergian lämpöenergiaksi. Mitä enemmän autolla on massaa ja nopeutta, sitä enemmän lämpöenergiaa syntyy jarrutustilanteessa. Yleinen luulo ajoneuvojen jarrujärjestelmistä on se, että

jarrut pysäyttävät auton liikkeen. Näin ei kuitenkaan varsinaisesti ole, koska perinteisessä autossa jarrujärjestelmä hidastaa ainoastaan jarrulevyn tai jarrurummun pyörintäliikkeen. Todellinen auton liikkeen hidastuminen tapahtuu kuitenkin renkaan ja tienpinnan välillä. Voidaankin heti alkuun todeta, että edes ideaalisinkaan jarrujärjestelmä ei voi tuottaa enempää pitoa, kuin mitä renkaan ja tienpinnan välillä vallitsee.

2.3.1 Toimintaperiaate

Perinteisen käyttöjarrun toiminta perustuu hydrauliseen tehonsiirtoon, ja periaatteellinen mekaanishydraulinen toiminta voidaankin tiivistää muutamaa eri kohtaan tapahtumajärjestyksessä (kuva 2).

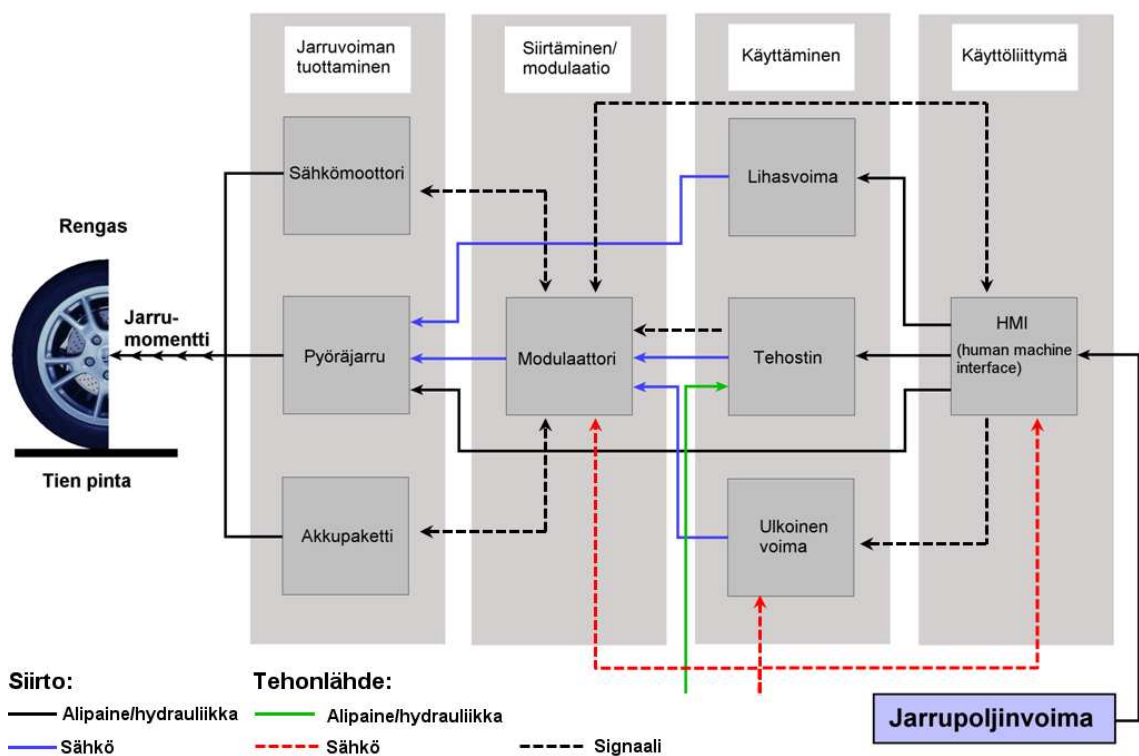


Kuva 2. Jarrujärjestelmän toiminta [2, s. 11]

1. Kuljettaja painaa jarrupoljinta voimalla F_F , joka työntää jarrupääsylinterin määntää välitangon välityksellä ja suljettuun hydraulijärjestelmään syntyy paine.
2. Hydraulipaine saa pyöräjarrusylinterin männän liikkumaan voimalla F_{SP} ja se puristaa kitkapalan jarrulevyä tai jarrurumpua vasten.

3. Jos auto on liikkeessä, syntyy renkaan ja tienpinnan välille jarruttava voima F_B , joka hidastaa renkaan pyörintäliikettä.

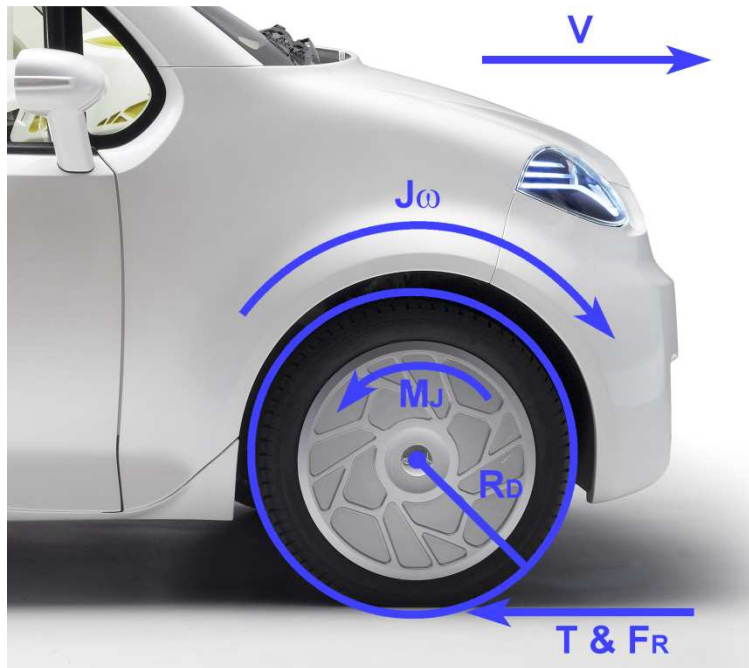
Jarrujärjestelmän toimintaa voidaan selvittää myös kuvan 3 mukaisella kaaviolla. Jokainen näistä kaavion perusosista määrää hidastuvuuden ratkaisevien jarruvoimien annostuksessa. Koska erilaisia tehtäviä ja ajoneuvotyyppjä varten asetetaan erilaisia vaatimuksia, kehittyä myös toisistaan poikkeavia jarrujärjestelmiä. Poikkeukset jarrujärjestelmät kuitenkin ovat samaa käyttötarkoitusta varten, vaikka niiden osien laatu, malli tai toimintaperiaate saattaisikin poiketa toisistaan.



Kuva 3. Jarrujärjestelmän toimintakaavio

2.3.2 Jarrutustapahtuma

Itse jarrutustapahtumaa voidaan kuvata kuvan 4 mukaisella tilanteella, jossa jarruvoima voidaan laskea, kun tiedetään vierintävastusvoima, pyörivien osien massahitausmomentti, kulmahidastuvuus, jarruttava momentti ja renkaan dynaaminen säde. [3, s. 8.]



Kuva 4. Jarrutustapahtuma autossa

Jarruvoima voidaan laskea kaavalla

$$T = \frac{(M_J - J\omega + F_R * R_D)}{R_D}$$

T = jarruvoima

F_R = vierintävastusvoima

J = renkaasta, vanteesta ja jarrulevystä syntyvä massahitausmomentti

ω = kulmahidastuvuus

M_J = jarruttava momentti

R_D = renkaan dynaaminen säde

2.4 Jarrujärjestelmän toimintavarmuus ja turvallisuus

Puhuttaessa mistä tahansa liikkuvasta ajoneuvosta, tulisi jarrujärjestelmän olla viimeinen järjestelmä, joka ajoneuvosta menee epäkuntoon. Näin mahdollistetaan ajoneuvon liikkeen hidastaminen kaikissa tilanteissa.

Jarrujärjestelmän on toimittava turvallisesti kaikissa olosuhteissa:

- erilaiset tienpinnan olosuhteet: jäinen, luminen, kostea, märkä, liukas tai kuiva
- auto kuormattu tai kuormaamaton
- jarruttaessa suoralla tai mutkassa
- uudet tai käytetyt jarrukomponentit
- märät tai kuivat jarrukomponentit
- kuljettajan ominaisuudet: aloittelija tai kokenut
- vedettäessä esim. peräkärryä.

Henkilöautoissa jarrujärjestelmä voidaan jakaa käyttöjarruun ja seisontajarruun. Näistä käyttöjarru on jaoteltu kahteen eri hydraulipiiriin, mikä mahdollistaa käyttöjarrun osittaisen toiminnan, mikäli jarrujärjestelmän hydraupiiressä ilmenee esimerkiksi vuoto. Seisontajarrua voidaan käyttää auton paikallaan pitämiseen lisäksi mahdollisena hätäjarruna, mikäli käyttöjarrussa ilmenee häiriö.

Tutkimusten mukaan noin 90 % kaikista auto-onnettomuuksista johtuu ihmisten tekemistä virheistä ja loput 10 % auton mekaanisista vioista. Alle 2 % kaikista onnettomuuksista johtuu jarrujärjestelmien epäkunnosta. Näistä jarrujärjestelmien aiheuttamista onnettomuuksista 89 % johtuu jarrujärjestelmän epäkunnosta ja 11 % väärästä balanssista joko vasemman tai oikean puolen pyörien välillä, tai etu- ja takapyörien välillä. [1, s. 471.]

Suomessa kuolee vuosittain Tilastokeskuksen mukaan n. 250 henkilöä liikenneonnettomuuksissa. Mikäli oletetaan että noin 2 % kaikista onnettomuuksista johtuisi jarrujärjestelmien epäkunnosta, tarkoittaisi se Suomessa n. 5 henkilön hengen menettämistä vuodessa. Lukua voidaan pitää tieliikenteessä liikkuvaan ajoneuvomäärään ja ajoneuvojen ikään nähden pienenä, mutta silti jokainen menetetty ihmishenki on liikaa.

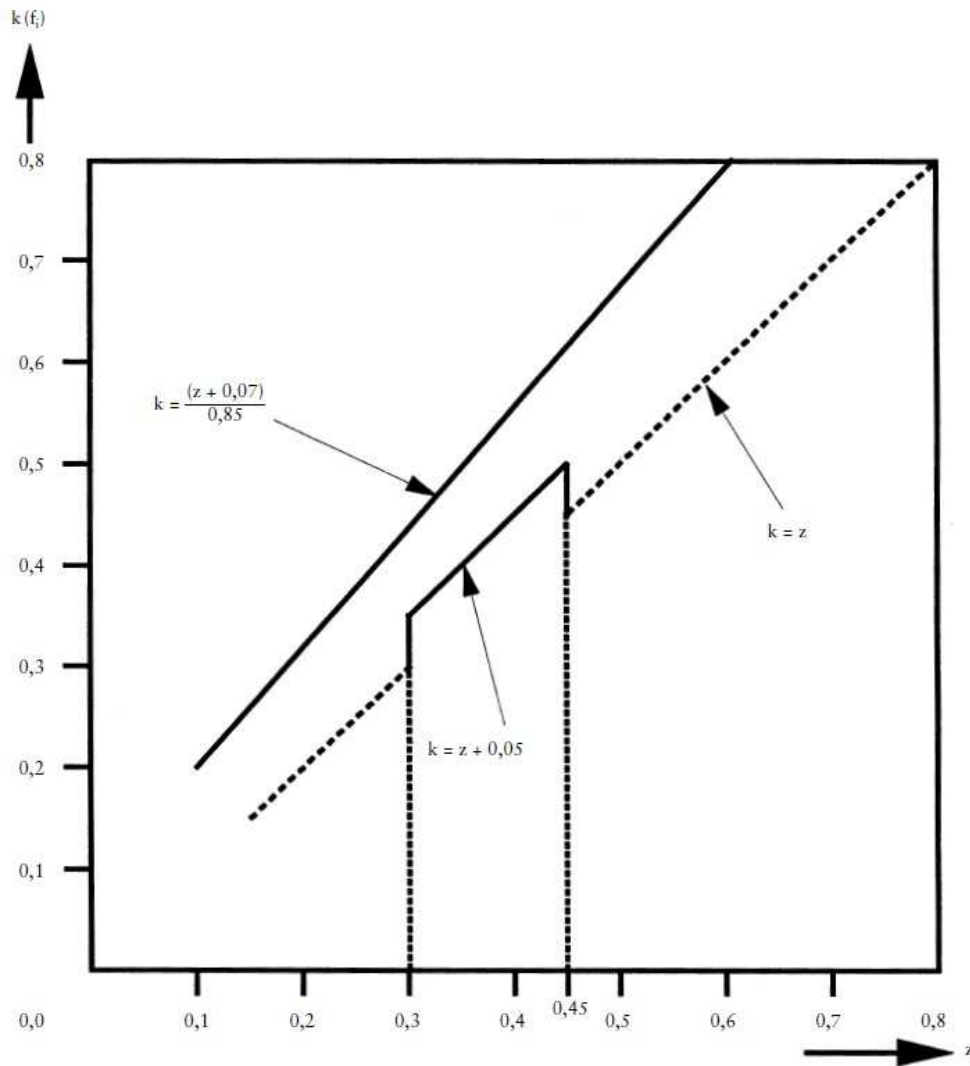
Saksalaisten tutkimusten mukaan mitä vanhempi auto on kyseessä, sitä suurempi on riski joutua onnettomuuteen. Tutkimuksen mukaan 12–14 vuotta vanhat ajoneuvot omaavatkin n. 10-kertaisen riskin verrattuna uudehkoihin alle kaksi vuotta vanhoihin autoihin. [4, s. 4.]

2.5 Lain asettamat vaatimukset jarrujärjestelmälle

Euroopan yhteisöjen komissio on luonut direktiivin 98/12/EY, joka määrittää M1-luokan ajoneuvon jarrujärjestelmälle asetettavat yhteiset vaatimukset Euroopan unionin sisällä. Direktiivistä löytyy tarkat ohjeet jarrujärjestelmälle ja seuraavaksi esitellään insinöörityönkannalta oleelliset. [5.]

2.5.1 Kitkakäyrä

Henkilöautossa on etuakselin kitkakäyrän oltava taka-akselin vastaavan käyrän yläpuolella kaikissa kuormaustiloissa, kun jarrutussuhde on 0,15 - 0,8. Kuvassa 5 nähdään EU:n direktiivin 98/12/EY [5, s. 32] mukaiset vaatimukset kitkakäyrille. Tällä taataan henkilöauton riittävä hidastuvuus ja turvallisuus, koska direktiivi ei salli takapyörien lukkiutumista ennen etupyöriä mainitulla jarrutussuhdevälillä.



Kuva 5. EU:n direktiivin 98/12/EY kitkakäyrä. k = kitkakerroin ja z = hidastuvuus (G). [5, s. 32.]

2.5.2 Käyttöjarru

Käyttöjarrun on vaikutettava kaikki pyöriin, ja kulumissäädön pitää olla automaattinen vähintään etujarruissa. Jarrujärjestelmän tehovaatimuksiin direktiivissä on esitetty kaava, joka laskee keskimääräisen täysin kehittyneen hidastuvuuden autolle:

$$d_m = \frac{V_b^2 - V_e^2}{25,92(S_e - S_b)} \text{ m/s}^2$$

V_1 = ajoneuvon alkunopeus

d_m = keskimääräinen täysin kehittynyt hidastuvuus

V_b = ajoneuvon nopeus $0,8V_1$ (km/h)

V_e = ajoneuvon nopeus $0,1V_1$ (km/h)

S_e = V_1 :n ja V_b :n välillä kuljettu matka metreinä

S_b = V_1 :n ja V_e :n välillä kuljettu matka metreinä

2.5.3 Käyttöjarrun teho

Tyyppi 0 -testi on suoritettava moottori sammutettuna alkunopeudella 80 km/h ja maksimipoljinvoiman ollessa 500 N. Lisäksi pitää täytyä keskimääräinen minimi hidastuvuusvaikutus $5,8 \text{ m/s}^2$.

$$S \leq 0,1 * v + \frac{v^2}{150}$$

S = jarrutusmatka (m)

v = testin aloitusnopeus (km/h)

Laskukaavaan sijoittamalla testin alkunopeus 80 km/h saadaan laskettua lain sallima maksimijarrutusmatka:

$$S \leq 0,1 * 80 \frac{\text{km}}{\text{h}} + \frac{(80 \frac{\text{km}}{\text{h}})^2}{150}$$

$$S \leq 50,6 \text{ m}$$

Tyyppi 0 -testi on suoritettava moottori kytkettynä alkunopeuden ollessa 80 % ajoneuvon rakenteellisesta maksiminopeudesta ja maksimipoljinvoiman ollessa 500 N. Lisäksi pitää täytyä keskimääräinen minimi hidastuvuusvaikutus 5 m/s^2 .

$$S \leq 0,1 * v + \frac{v^2}{130}$$

S = jarrutusmatka (m)

v = testin aloitusnopeus (km/h)

Laskukaavaan sijoittamalla testin alkunopeus (80 % ajoneuvon rakenteellisesti maksiminopeudesta) 160 km/h saadaan laskettua lain sallima maksimijarrutusmatka:

$$S \leq 0,1 * 160 \frac{km}{h} + \frac{(160 \frac{km}{h})^2}{130}$$

$$S \leq 186,6 m$$

2.5.4 Käyttöjarrun jäänösteho

Mikäli käyttöjarrussa ilmenee vika jossain sen välityslaitteiston osassa, on sen silti saatettava enintään seuraavien taulukossa 1 esitettyjen arvojen mukainen jarrutusmatka ja vähintään seuraavien arvojen mukainen keskimääräinen täysin kehittynyt hidastuvuus, kun käyttölaitteeseen kohdistettu voima on enintään 700 N ja testi tehdään tyyppi 0 -testillä vaihde vapaalla. Taulukossa 1 on laskukaavat ja lasketut jarrutusmatkat käyttöjarrun jäänösteholle.

Taulukko 1. Käyttöjarrun jäänöstehon laskeminen

Kuormitettuna	Kuormittamattomana
$v = 80 \frac{km}{h}$	$v = 80 \frac{km}{h}$
$a = 1,7 \frac{m}{s^2}$	$a = 1,5 \frac{m}{s^2}$
$S \leq 0,1 * v + \frac{100}{30} * \frac{v^2}{150}$	$S \leq 0,1 * v + \frac{100}{25} * \frac{v^2}{150}$

$S \leq 0,1 * 80 + \frac{100}{30} * \frac{80^2}{150}$	$S \leq 0,1 * 80 + \frac{100}{25} * \frac{80^2}{150}$
$S \leq 150,2 \text{ m}$	$S \leq 178,7 \text{ m}$

2.5.5 Varajarrujärjestelmä

Varajarrujärjestelmällä, vaikka sen käyttölaitetta käytettäisiin myös muihin jarrutustoimintoihin, ei saa ylittää EU:n direktiivin suurinta M1-ajoneuvolle asetettua jarrutusmatkaa. Varajarrutusjärjestelmän teho on tarkastettava tyypin 0 -testillä vaihde vapaalla alkunopeudella 80 km/h. Jos varajarrujärjestelmän käyttölaite on käsikäyttöinen, jarrulle vahvistettu teho on saavutettava, kun käyttölaitteeseen kohdistetaan 400 N:n voima. Jalkakäyttöisissä käyttölaitteissa voima on 500 N.

Jarrutusmatka voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$S \leq 0,1 * v + \frac{2 * v^2}{150}$$

Edelliseen kaavaan sijoittamalla esimerkiksi jarrutus nopeudesta 80 km/h saadaan varajarrujärjestelmällä jarrutusmatkaksi:

$$S \leq 0,1 * 80 \frac{km}{h} + \frac{2 * (80 \frac{km}{h})^2}{150}$$

$$S \leq 93,3 \text{ m}$$

2.5.6 Seisontajarru

EU:n direktiivin 98/12/EY [5, s. 23] määrittelee seisontajarrun toiminnalle seuraavat ehdot:

Seisontajarrulla on varajarrun ominaisuudessa saavutettava jarrutusmatka, joka ei ylitä seuraavaa arvoa, sekä keskimääräinen täysin kehittynyt hidastuvuus, joka lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$s = 0,1 v + \frac{2 v^2}{150}$$

jossa

s = matka (m)

v = nopeus (m/s)

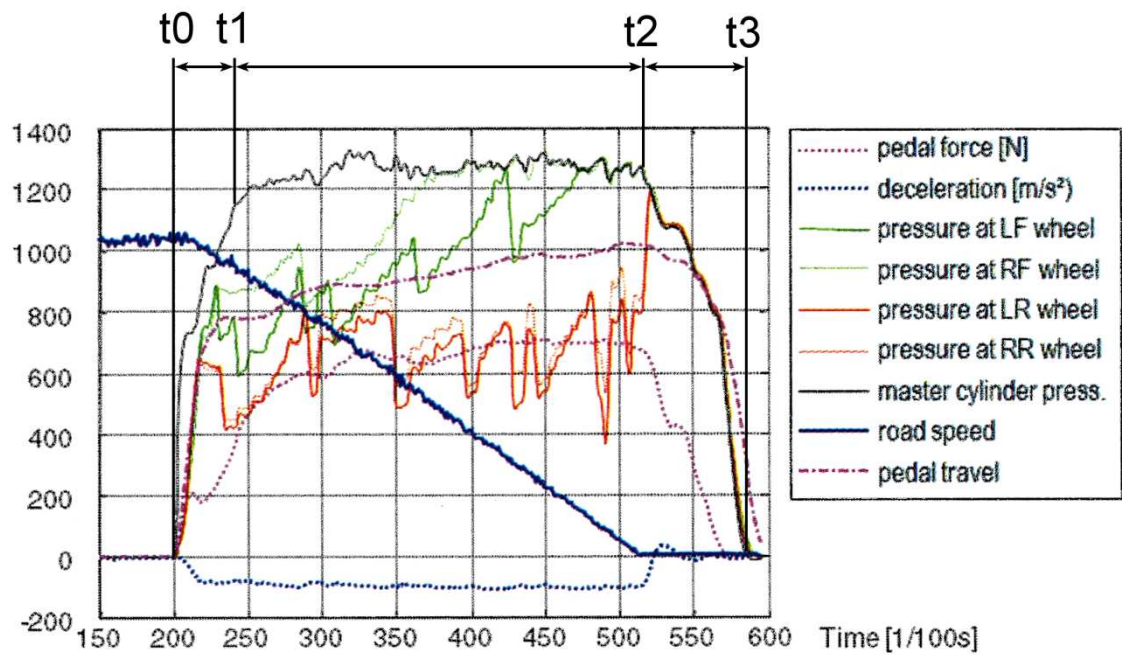
Seisontajarrujärjestelmän on pystyttävä pitämään kuormitettu ajoneuvo paikallaan ylä- tai alamäessä, jonka kaltevuus on 18 prosenttia, vaikka se olisi yhdistetty johonkin muuhun jarrujärjestelmään. Lisäksi sellaisen ajoneuvon osalta, joka on hyväksytty perävaunun vetoon, seisontajarrujärjestelmän on pystyttävä pitämään ajoneuvoyhdistelmä paikallaan ylä- tai alamäessä, jonka kaltevuus on 12 prosenttia.

Jos käyttölaite on käsikäyttöinen, siihen kohdistettava voima saa olla henkilöautossa enintään 400 N ja jalkakäyttöisissä 500 N. Myös sellainen seisontajarrujärjestelmä, jota on käytettävä useita kertoja ennen vaaditun tehon saavuttamista, on hyväksyttävä.

Tyyppi 0 -testi on tehtävä vaihde vapaalla 30 km/h:n alkunopeudella, jolloin seisontajarrulla on saavutettava ennen täyttä pysähtymistä vähintään 1,5 m/s² hidastuvuus.

2.6 Jarrujärjestelmän toimintaviiveet

Jarrutuksen viiveitä voidaan kuvata kaaviolla, josta selviää jarrutuksen kolme eri vaihetta: jarrujärjestelmän aktivointiviive, jarrutusaika ja jarrujärjestelmän vapautusviive. Kuvassa 6 on suoritettu jarrutus ABS-jarrujärjestelmällä aloittaen nopeudesta 100 km/h ja lopettaen siihen, kun auto on täysin pysähtynyt. Kuvasta voidaan toimintaviiveiden lisäksi nähdä myös, mitä muutoksia jarrutustilanteessa tapahtuu poljinvoimalle, hidastuvuudelle, jarrupaineille, pääsylinterin paineelle, ajonopeudelle ja polkimen liikematkalle.



Kuva 6. Kuvaaja jarrutuksessa mitattavista suureista [9, s. 164]

Kuvaajasta voidaan todeta seuraavat vaiheet jarrutustapahtumasta.

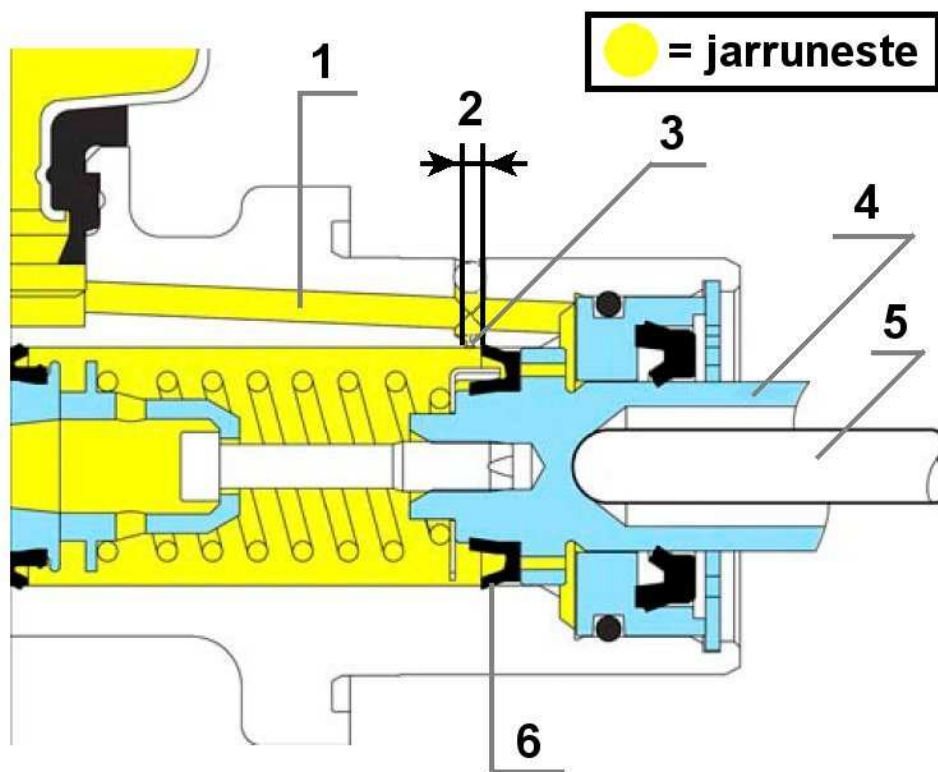
- t_0 on jarrutuksen aloituspiste
- $t_0 - t_1$ on aktivointiviive
- $t_1 - t_2$ on jarrutusaika
- $t_2 - t_3$ on vapautusviive
- t_3 on jarrutuksen lopetuspiste.

2.6.1 Aktivointiviive

Jarrujärjestelmän toimintaviiveistä merkittävämpi turvallisuuden kannalta on viive, joka alkaa siitä, kun kuljettaja koskee jalalla jarrupoljinta aikomuksena hidastaa auton nopeutta, ja loppuu siihen, kun jarrupaine alkaa nousta. Tätä viivettä kutsutaan aktivointiviiveeksi, joka voidaan jakaa kytkennän alkuviiveeseen ja paisunta-aikaan. Kytkenän alkuviive on aika, johon vaikuttaa merkittävästi jarrupolkimen liikematkan alussa olevan

tyhjä osuus, missä ei tapahdu mitään jarrupaineiden nousun kannalta. Tähän liikematkahan sisältyy jarrupääsylinterin ns. cut-off -liikematra, mikä on pääsylintereissä yleisesti suunniteltu siten, että sitä ei voi jälkeinpäin muuttaa lukuun ottamatta kilpa-autoja. Paisunta-aika on aika, joka kuluu jarruvoiman vaikutuksen (hidastuvuuden) alkamisesta, tietyn arvon saavuttamiseen (75 % pyöräjarrun asymptoottisesta loppupaineesta). Aktivointiviiveeseen vaikuttaa myös jarrunesteen viskositeetti ja jarrupalojen tai jarrukenkien kitkamateriaali.

Cut-off -liikematkalla tarkoitetaan sitä liikematraa (kuva 7), jonka pääsylinterin mäntä liikkuu eteenpäin, ennen kuin järjestelmässä alkaa nousta hydraulipaine. Paineen nousu on mahdollista vasta sitten, kun männän tiiviste on ohittanut pääsylinterin jarrunestesäiliön liitännän reiän. Vasta tuon pisteen ohittamisen jälkeen hydraulijärjestelmä on suljettu ja paine alkaa nousta.



Kuva 7. Jarrupääsylinterin leikkauskuva: 1. Jarruneste säiliöstä, 2. Cut-off -liikematra, 3. Jarrunesteen sisäänmenoportti hydraulijärjestelmään, 4. Mäntä, 5. Voima jarrutehostimelta, 6. Männän tiiviste [2, s. 29]

2.6.2 Vapautusviive

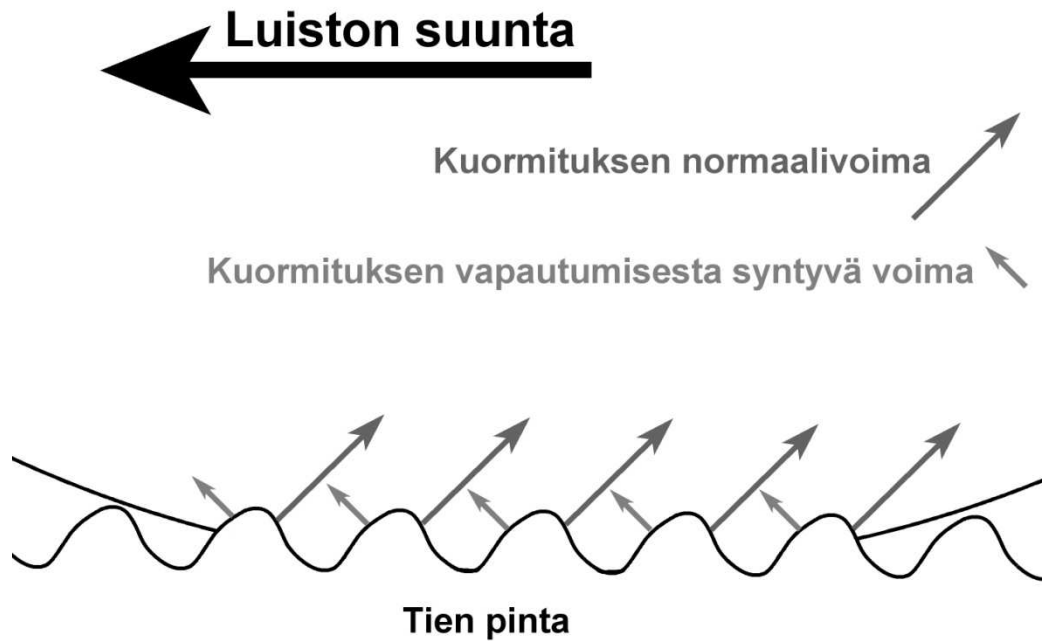
Edellisen viiveen vastakohta on vapautusviive, joka alkaa siitä, kun kuljettaja vapauttaa jalan polkimelta aikomuksena lopettaa jarrutus, ja loppuu siihen, kun jarrupiirien hydraulipaineet ovat laskeneet nolleen. Vaarana voi olla että järjestelmässä esiintyy hystereesiä, joka aiheuttaa sen, että jarrujärjestelmä ei palaudu takaisin normaalin tilaansa. Siinä tapauksessa jarrut voivat jäädä laahaamaan joko hetkeksi vapauttamisen jälkeen tai pidemmäksi aikaa pysyvästi. Silloin kyseessä on yleensä huollon puutteesta johtuva vika, mutta myös suunnittelulla voidaan vaikuttaa tämän mahdollisen vian esiintymiseen komponenttien iän myötä.

2.7 Kitkan muodostuksen mekanismit tienpinnan ja renkaan välillä

Painettaessa jarrupoljinta kuljettaja tekee toivomuksen jarrujärjestelmälle auton liikkeen hidastumisen suhteen. Mikäli auto on liikkeessä, tuottaa jarrupolkimen painaminen momentin jarrulevyllä tai jarrurummulla, ja vanteen ansiosta momentti siirtyy renkaalle. Renkaan ja tienpinnan välinen kitkavoima synnyttää vastamomentin, joka yrittää vastustaa tämän jarrumomentin muodostumista, ja näin auton nopeus hidastuu. Jarruvoiman suuruus onkin suora funktio momentille, joka syntyy renkaalla ennen, kuin rengas lukittuu.

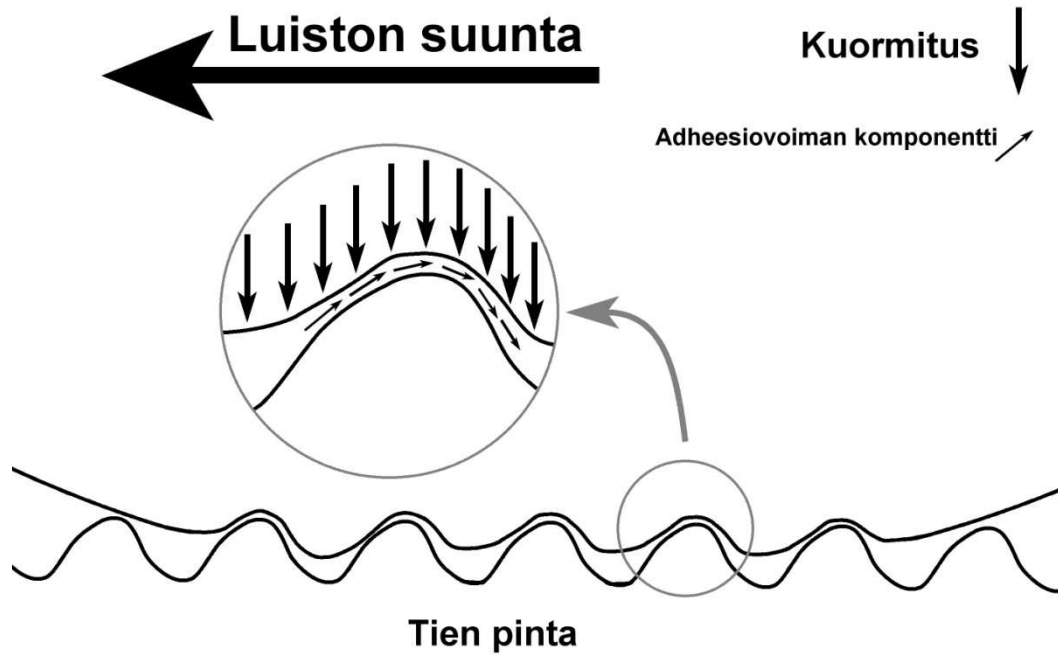
2.7.1 Kitkan muodostumisen periaate

Renkaan ja tienpinnan välillä syntyvä kitka muodostuu pääasiassa adheesiosta ja hystereesistä, joista hystereesi (kuva 8) syntyy kumimateriaalin sisäisestä energiahäviöstä, jolloin muotoaan muuttava rengas pystyy tuottamaan kitkavoiman. Sekä hystereesikitkan että adheesiokitkan suuruus riippuu liukunopeudesta. Hystereesikitkassa maksimi saavutetaan suurilla nopeuksilla ja adheesiokitkassa pienillä nopeuksilla.



Kuva 8. Renkaan kumiseoksen hystereesin tuottama pitkittäisvoima karkealla tienpinnalla

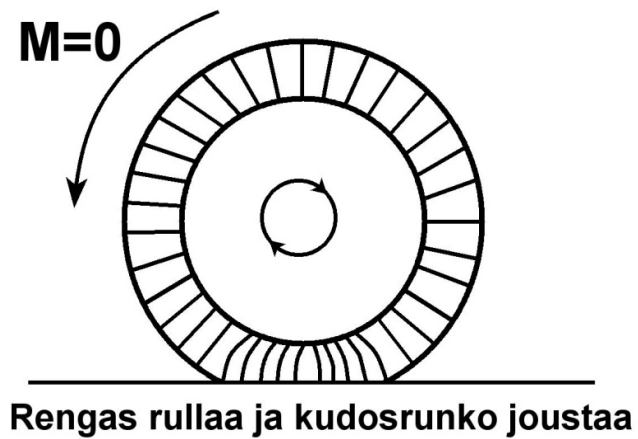
Adheesio taasen muodostuu renkaassa käytetyn kumimateriaalin elastisista ominaisuuksista, joiden ansiosta kumin kosketusala lisääntyy verrattuna koviin elastisiin materiaaleihin. Kumin adheesio kuitenkin vaatii lyhyen ja hyvän kontaktin tiehen, mikä tekee tien ja kumin vuorovaikutuksen herkäksi epätasaisuuksille ja lialle. Nämä aiheuttavat paikallisesti korkeita pintapaineita, joista syntyy suuria molekyylien välisiä voimia vastinpintojen välille. Pintojen liikkuesssa syntyy näin vastinpintojen välille työntövoimia, joiden vaakasuora summavektori on adheesiovoima. Esimerkiksi tien pinnalla oleva vesi riittää estämään renkaan ja tien pinnan välisen vuorovaikutuksen adheesion osalta. [6, s. 7.]



Kuva 9. Renkaan ja tienpinnan vuorovaikutuksesta syntyvä adheesiovoima

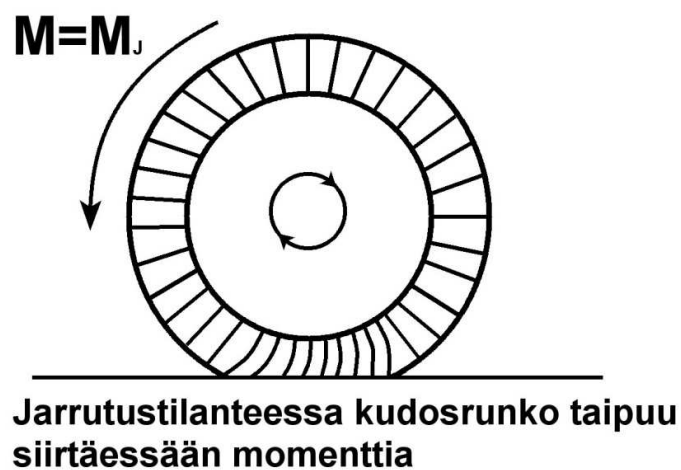
2.7.2 Pitkittäisvoiman muodostuminen

Eräs teoria renkaan pitkittäisvoiman muodostumisesta on ns. harjamalliteoria. Tässä teoriassa rengas voidaan ajatella harjamallina, jossa renkaan kosketus jaetaan tiettyyn määrään elastisia harjaksia, jotka koskettavat tietä. Rullatessaan vapaasti renkaan kuodosrunko joustaa, ja näin harjat joustavat symmetrisesti (kuva 10).



Kuva 10. Rullaava rengas

Jarrutustilanteessa (kuva 11) kudusrunko taipuu siirtäessään momenttia ja nämä harjakset tarrautuvat tiehen sekä alkavat venyä pitkittäisluiston (nopeuseron) johdosta. Jarrutustilanteessa rengas pyöriikin hitaammin kuin auton ajonopeus edellyttäisi. [6, s. 35.]



Kuva 11. Jarruttava rengas

2.8 Jarruvoiman säätölaitteet

Jarruvoiman säätölaitteita tarvitaan, jotta voidaan sovittaa pyöräjarrujen mitoitus perustuva etu- ja taka-akselin jarruvoimajako paremmin auton jarrutusvoimien paraabelinmuotoista ihannejakovaatimusta vastaavaksi. Tällä tavoin pyritään saavuttamaan mahdollisimman lyhyt jarrutusmatka sekä mahdollistetaan auton ohjattavuuden säilyvyys eri tilanteissa. Jarrutusvoimien ihannejakovaatimus riippuu ainoastaan auton staattisesta painoajasta, painopisteen sijainnista ja jarrutusvoimien suhteesta. [7, s. 608.]

2.8.1 ABS - jarrujen lukkiutumisenestojärjestelmä

ABS-järjestelmän ansiosta yksittäisen renkaan pitkittäisvoimaa pystytään säätämään ja näin auton ohjattavuus pyritään säilyttämään myös jarrutustilanteessa. Ideaalitilanteessa jarrutuksessa jokainen rengas asettuisi n. 5–20 %:in luistoon, koska optimi luistoprosentti riippuu kelistä, nopeudesta ja renkaan ilmanpaineesta [7, s. 584]. Tällöin rengas pystyy tuottamaan maksimipitkittäisvoiman, mutta todellisessa tilanteessa tämän saavuttaminen on kuitenkin vaikeaa, koska jos rengas ylittää saavutettavan pitkittäisvoiman maksimin, lukkiutuu rengas välittömästi epästabiilista tilasta johtuen. Mitä aikaisemmin jarrutuksen alussa renkaan lukkiutumista pystytään rajoittamaan, sitä lyhyempi jarrutusmatka syntyy, koska jarrutuksen alussa auton nopeus on suurimmillaan. [6, s. 112.]

ABS-järjestelmässä jokaisen renkaan pyörintänopeutta mitataan ja heti kun rengas uhkaa lukittua, alennetaan kyseisen pyöräjarrun jarrupainetta. Vastaavasti kun renkaan pyörintänopeus jälleen kasvaa, voidaan jarrupainetta nostaa. Näiden kahden vaiheen välissä saattaa olla hetki, jossa jarrupainetta pidetään vakiona. Näin ollen renkaan pyörimisnopeus muuttuu ABS-jarrutuksessa jatkuvasti ja tämä välittyy myös kuljettajalle tarisevänä jarrupolkimena. [6, s. 113.]

2.8.2 Takajarruvoiman säätölaite

Jarruvoiman säätölaite tarvitaan autossa taka-akselilla, koska kiinteällä jarruvoimajalla jarrujärjestelmä toimii optimaalisesti vain tietyissä olosuhteissa, ja näin ollen taka-

jarruvoiman rajoitinventtiilin avulla pyritään säätämään takajarruvoima jarrutustilannetta paremmin vastaavaksi ja estämään takapyörien lukittuminen ennen etupyöriä.

Vanhemmissa autoissa käytettiin kuormitussäätöisiä ja hidastuvuussäätöisiä takajarruvoiman rajoitinventtiilejä, mutta näistä on luovuttu ja on siirrytty elektroniseen takajarruvoiman säätöön. [3, s. 15.]

Elektroninen takajarruvoiman säätö (EBD) pohjautuu ABS-järjestelmään, mutta se on ohjelmoitu erilailla. EBD tarvitsee kolme erilaista komponenttityyppiä:

1. anturit, jotka mittaavat renkaiden luistoa ja jarrujärjestelmän hydraulipainetta
2. venttiilit, jotka sovittavat pyöräjarruvoiman oikeaksi
3. ohjausyksikkö, joka laskee pyöräjarruvoiman tilannetta vastaavaksi.

Jotta pystytään määrittämään renkaan luistosuhde, tarvitaan renkaan pyörintänopeus ja auton maanopeus. Jos rengas pyörii hitaammalla nopeudella kuin auto liikkuu, niin rengas luistaa ja siitä voi olla seurauksena renkaan lukkiutuminen. Tämän vuoksi EBD mittaa renkaan pyörintänopeutta ja laskee kaikkien renkaiden pyörintänopeuden keskiarvon, jotta tiedetään arvio auton maanopeudesta. Pyöräjarruvoima sovitetaan oikeaksi säätämällä jarrupiirin hydraulipaine elektronisesti ohjattujen venttiilien avulla. Elektronisia venttiilejä ohjataan ohjausyksikön avulla, joka saa tiedon pyörien nopeusantureilta ja laskee siitä renkaiden luistosuhteen. Näin saadaan säädettyä jokaisen renkaan luistosuhde tilanteeseen sopivaksi. [8]

Ajettaessa mutkaan suurin osa EBD-järjestelmistä mittaa myös auton kallistumaa, jota voidaan verrata ratin kääntökulmaan. Tällä tavoin voidaan määrittää, onko auto yliohjaavassa (liikaa korin kallistumaa suhteessa renkaan kääntökulmaan) vai aliohjaavassa (liian vähän korin kallistumaa suhteessa renkaan kääntökulmaan) tilassa. Tällä tavoin EBD voi korjata myös auton kulkusuuntaa jarruttamalla takapyöriä. [8]

2.9 Jarrujärjestelmä M1-luokan sähköajoneuvossa

Sähköautossa jarrujärjestelmä ei poikkea juurikaan tavanomaisista polttomoottori autoista. Kuten dieselkäyttöisissä autoissakin myös sähköautossa jarrutehostimeen ei saada alipainetta imusarjasta, joten myös sähköautot pitää varustaa erillisellä alipainepumpulla. Lisäksi sähköauto mahdollistaa jarruenergian talteenoton, jolloin käyttämällä sähkömoottoria generaattorina voidaan jarrutustilanteessa ladata auton akkupakettia.

2.9.1 Sähköauton asettamat vaatimukset jarrujärjestelmälle

Tämän päivän sähköauton jarrujärjestelmä poikkeaa polttomoottoriauton jarrujärjestelmästä todella vähän. Kuten aikaisemmin mainittiin, myös sähköautossa pitää käyttää jarrutehostimelle erillistä alipainepumppua dieselauton tapaan. Sähköauto mahdollistaa myös helposti toteutettavan jarrutusenergian talteenoton, kun sähkömoottoria voidaan käyttää generaattorina lataamaan akkupakettia. Mikäli sähkömoottorilla jarrutetaan taka-akselin rengasta tai renkaita, tulee jarrutusenergian talteenotossa huomioida, etteivät takarenkaat saisi lukittua missään tilanteessa ennen eturenkaita. Vaikka sähkömoottorilla voidaanakin hidastaa auton liikettä, ei auton jarrujärjestelmää voida kuitenkaan jättää pelkän sähkömoottorin varaan, koska nykypäivän sähkömoottoreilla ja akkuteknologialla saavutettava maksimihidastuvuus on n. 0,3 G, joka ei yksinään vielä täytä lain vaatimuksia. Tämän vuoksi auto pitää varustaa myös erillisillä pyöräjarruilla. [9, s. 163.]

2.9.2 Energian talteenotto

Energian talteenotto voidaan jakaa kahteen eri tilanteeseen, joissa auton kineettistä liike- tai potentiaalienergiaa otetaan talteen: jarrutuksessa tapahtuva energian talteenotto ja moottorijarrutuksessa tapahtuva energian talteenotto. Kummassakin tilanteessa voidaan ottaa talteen auton kineettistä liike-energiaa käyttämällä sähkömoottoreita hetkellisesti lataamaan akkupakettia tai superkondensaattoria. Jarrutusenergian talteenotossa on otettava huomioon turvallisuuden lisäksi matkustajien mukavuus, koska jarruenergian talteenoton voimakkuus määrittelee myös auton hidastuvuuden.

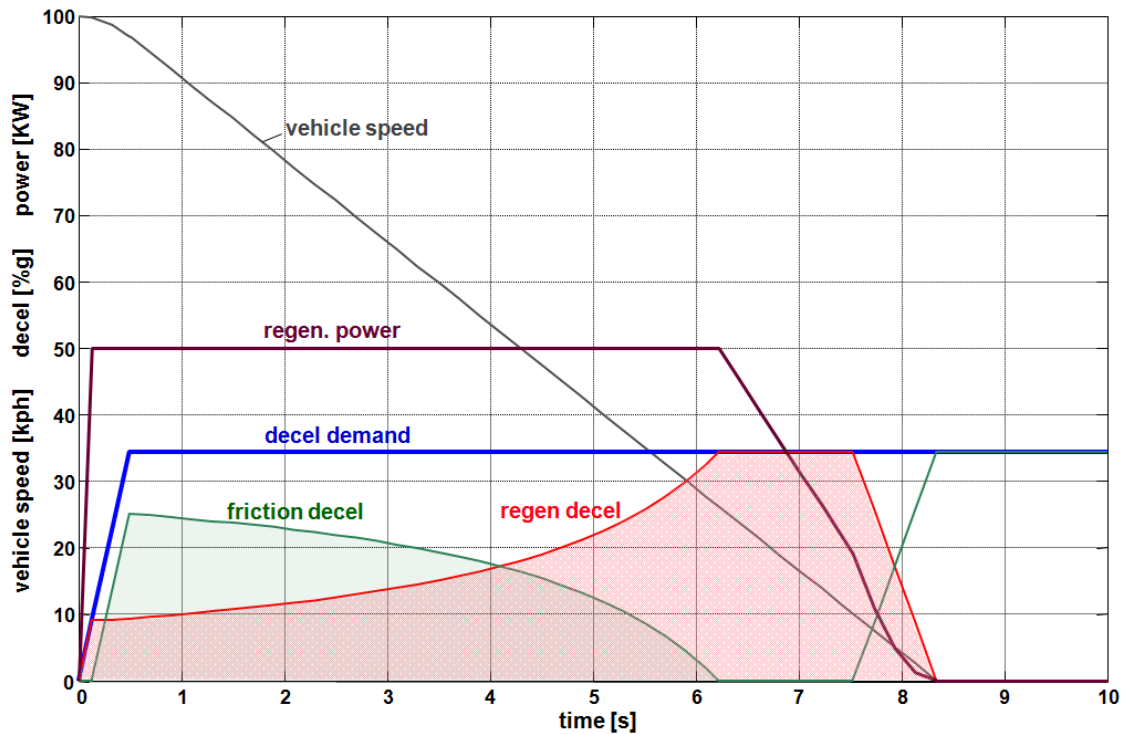
Energian talteenoton hyödyt näkyvät energiatehokkuudessa. Suurin etu tulee ajettaessa kaupungissa tai ruuhkassa, joissa tulee paljon kiihdytyksiä ja jarrutuksia. Energian talteenotossa käytetään ns. Brake By Wire -teknologiaa, jossa fyysinen kontakti kuljettajan ja jarrujärjestelmän välillä on poistettu ja tilalla on antureita mittaamassa, miten paljon jarruvoimaa tarvitaan, jotta auto saavuttaa kuljettajan tavoitteleman hidastuvuuden.

Perinteisessä jarrujärjestelmässä auton liike-energia muuttuu jarrutuksessa kitkan myötä lämmöksi ja haihtuu ilmaan. Myös perinteisissä autoissa liike-energiaa on mahdollista kerätä talteen erilaisilla järjestelmillä esimerkiksi erilliseen vauhtipyörään, joka esimerkiksi F1-autoissa pyörii jopa 70000 kierrosta minuutissa ja pystyy säilömään jopa 750 kilojoulea energiaa. Tämä energiasäilytys vastaa noin 1 kg:aa bensiiniä, mutta toisaalta pyörivällä vauhtipyörällä on gyroskooppisia ominaisuuksia ja se tuo lisää painoa, joten hyöty saattaa jäädä pieneksi. [10, s. 21.]

Sähköautoissa energian talteen ottaminen on helpompaa, koska auton liikuttamiseen käytettävää induktiomootoria voidaan käyttää generaattorina, jolloin auton liike-energia voidaan varastoida suoraan sähkövarastoon. Induktiomootorin käyttö onkin järkevää, koska sitä voidaan käyttää generaattorina ilman mitään muutoksia.

2.9.3 Perinteisen jarrujärjestelmän ja energian talteenoton yhdistäminen

Elektrohydraulisessa jarrujärjestelmässä yhdistetään jarruttaminen hydraulisella jarrujärjestelmällä ja sähkömootorilla (kuva 12). Näiden kahden järjestelmän yhdistäminen vaatii useita antureita, jotta voidaan määrittää, millaisen hidastuvuustavoitteen kuljettaja antaa ja millainen jarruvoima pitää tuottaa, jotta tämä kuljettajan hidastuvuustavoite täytettäisiin. Suurimpia haasteita on tunnistaa ajo-olosuhteet ja sitä myötä tien ja renkaan välinen kitkakerroin. Ideaalitilanteessa kuljettaja ei kuitenkaan huomaa painaessaan jarrupoljinta, käyttääkö auto jarrutukseen sähkömootoria, hydraulijärjestelmää, vai näitä molempia yhtäaikaaisesti.

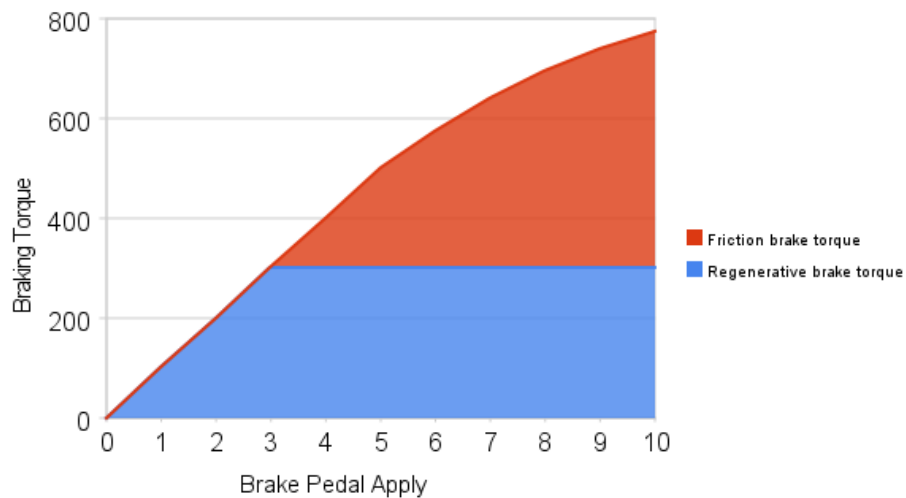


Kuva 12. Hydraulisen jarrujärjestelmän ja sähkömoottorilla jarruttamisen yhdistäminen [11]

Sähköautoissa on energiatehokkuus tärkeintä, joten sähköauto pyrkii aina jarruttamaan ensisijaisesti sähkömoottorilla, jotta energiaa saadaan varastoitua mahdollisimman paljon. Mikäli kuljettajan toivoma hidastuvuus ei kuitenkaan täyty pelkällä sähkömoottorilla jarruttamalla, käytetään lisäksi myös hydraulista jarrujärjestelmää. Nykypäivän akkuteknologia rajoittaa kuitenkin sähkömoottoreilla saavutetun maksimihidastuvuuden n. 0,3 G:hen, koska akkujen latausnopeus ei voi olla ääretön. Energian talteenoton määrä riippuu myös akkujen varaustilasta, koska jos akut on ladattu täyteen, ei jarruenergiaa voida varastoida.

Suurin ongelma muodostuu hydraulisen järjestelmän ja sähkömoottorilla jarruttamisen yhdistämisessä. Energian talteenoton tuottama jarrumomentti on helppo määrittää, koska se on suoraan riippuvainen generaattorina toimivan sähkömoottorin jännitteestä. Ohjausjärjestelmä vähentää regeneroinnin tuottaman jarrumomentin vaaditusta kokonaisjarrumomentista. Tämä jäljelle jäävä jarrumomentti jätetään hydraulijärjestelmän tuotettavaksi, ja siitä onkin muodostunut eri auto- ja komponenttivalmistajien haastavin osuus. Elektrohydraulisissa jarrujärjestelmissä kun hydraulijarrujärjestelmän jarrupaine on osittain itsenäinen riippumatta kuljettajan jarrupoljinvoimasta. Mikäli halutaan hallita tämäntyyppistä järjestelmää, on taustalla oltava pitkälle kehitetty matemaatti-

nen malli hydraulipaineen ja jarrumomentin välisestä toimintasuhteesta (kuva 13). Kun haluttu kitkajarruvoima on määritetty matemaattisen mallin ja eri antureiden avulla, hydraulijärjestelmän ohjainyksikkö yrittää täyttää välin kokonais- ja regeneraatiojarrumomentin välillä. Jarrutusenergian talteenoton huono puoli on se, että jarrutusmomenttia ei ole tarjolla, ellei rengas ja sitä kautta sähkömoottori pyöri. Täten pienillä ajonopeuksilla jarrutusenergian määrä on rajoitettu, koska kun ajoneuvo tekee jarrutuksen ja auton liike on lähellä pysähtymistä, jarrutusenergian määrä laskee ja kitkajarrutuksen määrä nousee. [11]



Kuva 13. Kitkajarrun ja jarruenergian talteenoton jarrumomentin jakautuminen [11]

Jarruttaessa kitkajarruilla kitkapintojen lämpötila nousee ja hydraulipaineen ja jarruvoimien toimintasuhde muuttuu. Tämän suhteen muuttumiseen vaikuttaa myös kosteus ja jarrukomponenttien kuluneisuus. Hallintaohjelmiston pitää olla siis erittäin pitkälle kehitetty, ja sen pitää pystyä adaptoitumaan näihin eri tilanteisiin käyttäen erilaisia algoritmeja, mutta kuten tien ja renkaan välisen kitkakertoimen määrittäminenkin, eivät nämä arviot ole täydellisesti totuutta vastaavia. Näin ollen suunnitteluinsinöörit käyttävätkin tuhansia tunteja näiden järjestelmien kehittämiseen, jotta autojen tuotantoon siirtäminen ei kestäisi loputtomiin.

Hydraulisen jarrujärjestelmän ja jarrutusenergian talteenoton yhdistäminen onkin osoittautunut erittäin haastavaksi. Mikäli matemaattinen toimintamalli ei ole tarpeeksi tarkka ja pitkälle kehitetty, saattaa tämä aiheuttaa muutoksia auton hidastuvuudessa, vaikka kuljettaja painaisikin jarrupoljinta tasaisella voimalla. Mikäli matemaattinen malli yliar-

vioi jarrumomentin, se saattaa asettaa liian pienen hydraulipaineen, joka saattaa johdattaa väärään jarrutustilanteen hahmottamiseen. [11]

2.10 Jarrujärjestelmien eroavaisuudet

Automallista ja luokasta riippuen jarrujärjestelmälle asetetaan erilaisia vaatimuksia. Kaikilla automalleilla samaa on kuitenkin se, että jarrujärjestelmän on vähintään läpäistävä lain asettamat vaatimukset. On tiedettävä myös, millaiset jarrut tarvitaan ja mihin käyttötarkoitukseen. Tavanomaisessa henkilöautossa jarrujärjestelmälle asetetut vaatimukset kun ovat erilaiset kuin urheiluautossa, koska alkuperäinen käyttötarkoitus on erilainen.

Luvuissa 2.10.1 - 2.10.8 esiteltävän tutkimuksen mukaan suurimmat erot jarrujärjestelmissä eri automallien välissä syntyvät pyöräjarrujen fyysisestä kokoluokasta, koska niihin vaikuttaa suurelta osin auton suunniteltu maksiminopeus ja massa sekä käyttötarkoitus. Maksiminopeus, auton massa ja käyttötarkoitus määrittelevät pääosin sen, miten paljon pyöräjarrujen pitää sitoa lämpöenergiaa. Toisaalta jarrut saatetaan suunnitella jo alun perin ”ylitehokkaiksi”, jos auto suunnitellaan esimerkiksi urheilullista ajoa ajatellen. Tiedot eri automalleista on saatu automerkkien maahantuoilta.

2.10.1 Jarrujärjestelmä keskivertokuluttajalle

Keskivertokuluttajalle jarrujärjestelmä on ainoastaan jarrupoljin, jota painettaessa tietyllä voimalla auto saavuttaa tietyn hidastuvuuden. Voiman ja hidastuvuuden pitää olla lineaarinen, jotta ihminen pystyy pitämään jarrujärjestelmän toimintaa loogisena eri tilanteissa. Jarrujärjestelmä oli pitkään osa-alue autosta, joka jäi vähimmälle huomiolle, ja vasta viime vuosina jarrutusenergian talteenoton ja erilaisten elektronisten lisäjärjestelmien ansiosta jarrujärjestelmä on saanut uuden merkityksen. Nykypäivän jarrujärjestelmällä voidaan lisätä auton ekologisuutta käyttämällä jarrutusenergian talteenottoa. Lisäksi erilaiset elektroniset lisäjärjestelmät kuten mäkilähtöavustin (auttaa liikkeelle lähdössä ylämäkeen; auto ei valu taaksepäin) ja hätäjarrutehostin (lisää jarrutusvoimaa hätäjarrutustilanteessa) saattavat helposti vaikuttaa kuluttajan auton ostamiseen enemmän kuin jarrulevyjen koko ja jarrusatulan väri tai muut auton ominaisuudet.

2.10.2 Imago ja markkinointi

Esimerkiksi Porsche -automerkillä jo valmistajan mainospuheiden mukaan järeät jarrut ovat osa merkin imagoa. Nykypäivän jarrujärjestelmät sisältävät myös erilaisia lisäjärjestelmiä, joilla pyritään ei ainoastaan lisäämään kuljettajan mukavuutta, mutta myös parantamaan ajoturvallisuutta. Autovalmistajien esitteitä lukiessa saakin helposti sellaisen mielikuvan, että autoja pyritään nykypäivänä markkinoimaan myös erilaisten elektronisten lisäjärjestelmien avulla. [12, s. 58.]

2.10.3 Henkilöauto (Volkswagen Golf 1.2TSI vm. 2011)

Henkilöautosegmentissä pääpaino on varmasti kustannustehokkuudessa ja turvallisuudessa. Volkswagen Golf 1.2TSI edustaa nykypäivän perinteistä henkilöautoa, jolla on myös pitkä kehityshistoria. Volkswagen sisältää sekä edessä että takana uivat liukutappiohjatut jarrusatulat, mikä on kustannustehokas ratkaisu silti kuitenkin tinkimättä henkilöautolle asetettavasta suorituskyvystä tai turvallisuudesta. Uivilla jarrusatuloilla on parempi terminen rakenne lisäksi sekä pienempi tilantarve jarrulevyn ja vanteen välissä.

Taulukko 2. Volkswagen Golf 1.2TSI 2011 tiedot

Volkswagen Golf 1.2TSI 2011	
Auton omapaino	1300 kg
Etujarrulevyn halkaisija (jäähd.)	280 mm
Takajarrulevyn halkaisija	255 mm
Jarrusatulan männän halkaisija edessä	54 mm
Jarrusatulan männän halkaisija takana	38 mm
Jarrusatulan mäntien lukumäärä edessä	1 kpl
Jarrusatulan mäntien lukumäärä takana	1 kpl

2.10.4 Urheiluauto (Porsche 911 Carrera S vm. 2011)

Porsche mainitsee jo 911 Carrera -automallinsa esitteessä, että jarrut ovat osa sen automallien imagoa [12, s. 58]. Urheiluautoista puhuttaessa Porsche edustaa klassista automerkkiä, jonka varmasti kaikki tuntevat iästä huolimatta. Urheiluautoissa yleisesti on tehokkaampi moottori ja sitä myötä myös suurempi huippunopeudeus. Näin ollen jarrujärjestelmältä vaaditaan myös vastaavasti suurempaa suorituskkyä. Porsche 911 Carrera S:ssä on, sekä edessä että takana ns. monoblock -jarrusatulat, jolloin jarrusatula on valmistettu yhdestä kappaleesta. Tämä lisää jarrusatulan jäykkyyttä ja sen myötä myös jarrupoljintuntumaa tehden siitä tarkemman ja liikematkasta lyhyemmän.



Kuva 14. Porschen keraamiset komposiittijarrulevyt

Porsche tarjoaa myös lisävarusteena 911 Carrera -malleihin PCCB (Porsche Ceramic Composite Brake) -jarrupakettia (kuva 14). Käytännössä tämä muuttaa etujarrulevyn halkaisijan 350 mm:iin ja jarrulevyjen materiaali muuttuu keraamiseksi komposiittimateriaaliksi, jolloin jarrulevyn paino putoaa 50 %. Tämä tuntuu kuljettajalle parempana jarrujärjestelmän suorituskkyynä ja hallittavuutena, koska pyöriiden massojen ja jousittamattoman massan määrä on laskenut 50 %. [12, s. 60.]

Taulukko 3. Porsche 911 Carrera S 2011 tiedot

Porsche 911 Carrera S 2011	
Auton omapaino	1395 kg
Etujarrulevyn halkaisija (jäähd.)	340 mm
Takajarrulevyn halkaisija	330 mm
Jarrusatulan männän halkaisija edessä	32 ja 34 mm
Jarrusatulan männän halkaisija takana	32 mm
Jarrusatulan mäntien lukumäärä edessä	6 kpl
Jarrusatulan mäntien lukumäärä takana	4 kpl

2.10.5 Maastoauto (Land Rover Discovery 3.0TD vm. 2011)

Land Rover edustaa merkinä maastoautoilun historiaa, ja merkillä on myös vahva ote nykypäivän markkinoista. Land Rover Discovery 4:n jarrulevyt ovat massiiviset jopa Porschen jarrujen rinnalla. Auton kokonaismassa 3150 kg asettaa suuret vaatimukset myös jarrujärjestelmälle. Jarrusatulat ovat sekä edessä että takana uivat, mutta edessä on kaksi mäntää, kun takana on vain yksi. Jarrulevyt ovat edessä ja takana jäähdytetyt.

Taulukko 4. Land Rover Discovery TDV6 3.0 2011 tiedot

Land Rover Discovery TDV6 3.0 2011	
Auton omapaino	2580 kg
Etujarrulevyn halkaisija (jäähd.)	360 mm
Takajarrulevyn halkaisija	350 mm
Jarrusatulan männän halkaisija edessä	48 mm
Jarrusatulan männän halkaisija takana	45 mm

Jarrusatulan mäntien lukumäärä edessä	2 kpl
Jarrusatulan mäntien lukumäärä takana	1 kpl

2.10.6 Hyötyajoneuvo (VW Transportter 2.0TDI vm. 2011)

Vertailussa esitetty Volkswagen Transportter on lyhyt malli ja 16":n vanteella. Suuremmalla korilla tai suuremmalla vanteella varusteltuihin malleihin tulee massiivisemmat jarrut.

Taulukko 5. VW Transportter 2.0TDI 2011 tiedot

VW Transportter 2.0TDI 2011	
Auton omapaino	1950 kg
Etujarrulevyn halkaisija (jäähd.)	308 mm
Takajarrulevyn halkaisija	294 mm
Jarrusatulan männän halkaisija edessä	60 mm
Jarrusatulan männän halkaisija takana	41 mm
Jarrusatulan mäntien lukumäärä edessä	4 kpl
Jarrusatulan mäntien lukumäärä takana	4 kpl

2.10.7 Hybridi / GT-auto (Fisker Karma vm. 2011)

Karma edustaa maailman ensimmäistä sarjatuotantohybridiä, joka sijoittuu GT-autoluokkaan. GT tulee italiankielisistä sanoista *grand tourer* ja tarkoittaa suorituskykyistä yleistä autoa, jolla voi ajaa myös pitempiä matkoja.

Karma on valmistajan mukaan sähköauto, jossa on lisäksi polttomoottori, joka toimii toimintasäteen pidentäjänä. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että polttomoottoria ei ole kytketty perinteiseen tapaan mekaanisesti voimansiirtoon, vaan polttomoottori pyörittää 175 kW:n generaattoria, jolla ladataan akkuja.

Painavan akkupaketin vuoksi auto painaa n. 2400 kg, mikä asettaa omat vaatimuksensa myös jarrujärjestelmälle. Autossa on vakiona lukkiutumaton jarrujärjestelmä ja hätäjarrutehostin. Etu- ja taka-akselilla on italialaisen Brembon valmistamat monoblock-tyyppin jarrusatulat, jotka ovat kuin kilpa-autossa. Etujarruihin on todella panostettu, koska etujarrusatulat tarjoavat todella suuren puristusvoiman kuuden männän ansiosta ja etujarrulevyt ovat ulkohalkaisijaltaan 370 mm ja tyypiltään kaksiosaiset kelluvat.

Karmassa on lisäksi myös jarruenergian talteenotto, jolloin auton energiankulutuksen hyötysuhde paranee.

Taulukko 6. Fisker Karma 2011 tiedot

Fisker Karma 2011	
Auton omapaino	2404 kg
Etujarrulevyn halkaisija (jäähd.)	370 mm
Takajarrulevyn halkaisija	365 mm
Jarrusatulan männän halkaisija edessä	30, 34 ja 38 mm
Jarrusatulan männän halkaisija takana	32 mm
Jarrusatulan mäntien lukumäärä edessä	6 kpl
Jarrusatulan mäntien lukumäärä takana	4 kpl

2.10.8 Jarrujärjestelmän tehokkuus suhteessa auton painoon

Helpottaakseni arvioimaan jarrujen tuottamaa tehoa suhteessa auton painoon, kehitin kaavan, jonka avulla on mahdollista vertailla autojen jarrujärjestelmiä. Kaava vertaa jarrulevyjen halkaisijoita sekä jarrusatuloiden mäntien halkaisijoita ja lukumääriä auton painoon ja laskee yksiköttömän lukuarvon. Lukuarvon perusteella voi päätellä, mihin käyttötarkoitukseen auton jarrujärjestelmä on suunniteltu.

Kaava olettaa, että autojen hydraulipiireissä vallitsee sama hydraulipaine ja että jarrujärjestelmän balanssi on suunniteltu oikein, joten kaava ei ota kantaa jarrujärjestelmällä saavutettavaan suorituskyykyyn tai dynaamisiin ominaisuuksiin. Mikäli voidaan olettaa, että auton jarrujärjestelmä on oikein mitoitetu, voidaan suhdelukua käyttää myös auton teoreettisen suorituskyykyyn vertailemiseen ja siihen mihin käyttötarkoitukseen auto on suunniteltu.

Suhdeluku voidaan määrittää seuraavalla kaavalla:

$$z = \frac{L_e * M_e * N_e + L_t * M_t * N_t}{m * 0,01}$$

L_e = jarrulevyn halkaisija etuakselilla (mm)

M_e = jarrusatulan männän keskimääräinen halkaisija etuakselilla (mm)

N_e = jarrusatulan mäntien lukumäärä etuakselilla (kpl)

L_t = jarrulevyn halkaisija taka-akselilla (mm)

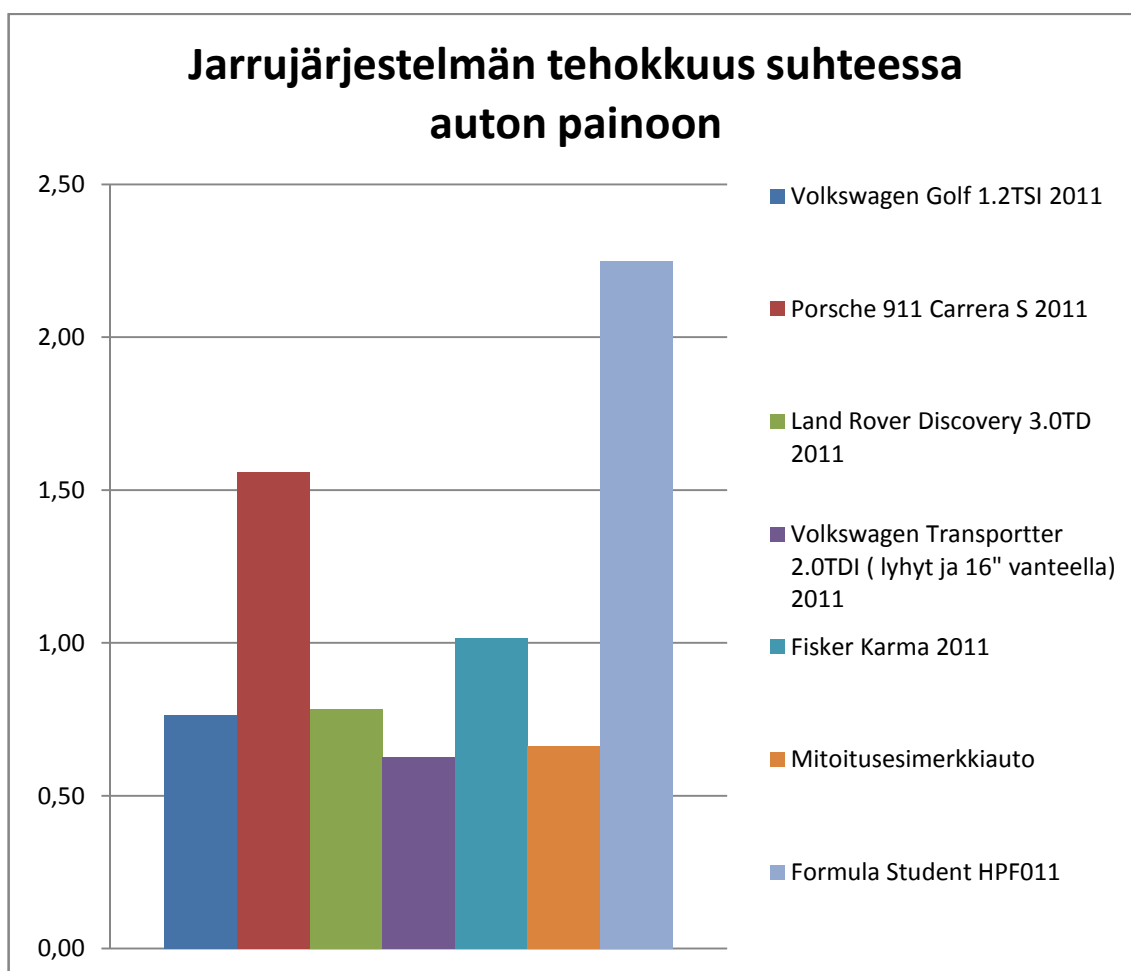
M_t = jarrusatulan männän keskimääräinen halkaisija taka-akselilla (mm)

N_t = jarrusatulan mäntien lukumäärä taka-akselilla (kpl)

m = auton massa (kg)

Mäntien lukumäärää laskiessa on huomioitava jarrusatulatyyppi. Kiinteässä jarrusatu-
lassa lasketaan mäntien lukumäärä yhteen akselia kohti, mutta uivassa jarrusatulassa
pitää mäntien lukumäärä kertoa kahdella Newtonin III lain mukaisesti.

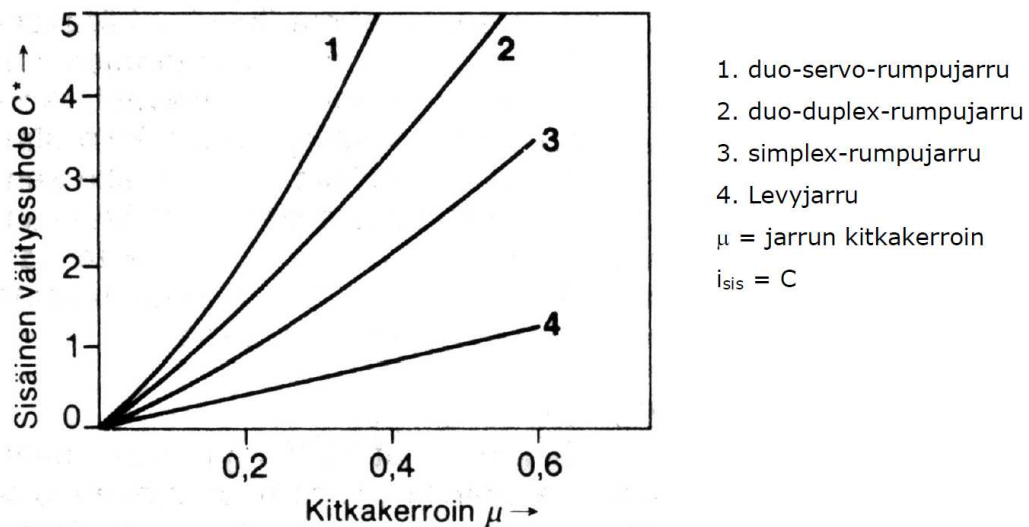
Kuvasta 15 voidaan nähdä, että kun yleinen suhdeluku Volkswagen Golfissa, Land Ro-
ver Discoveryssä ja Volkswagen Transportterissa on n. 0,6–0,8, niin Porsche 911:ssä
sama suhdeluku on n. 1,5. Tästä voidaan helposti päätellä, että Porschen jarrujärjes-
telmä on tehokas auton painoon nähden ja auto on suunniteltu soveltuvaksi myös ur-
heilulliseen ajoon. Fisker Karman jarrujärjestelmä on tehontuottokyvyltään samaa luok-
kaa Porschen kanssa, mutta Karman suhdelukua laskee auton suuri paino. Suhdeluvul-
taan Karma sijoittuu normaalin ja tehokkaan jarrujärjestelmän välimaastoon. Formula
Student -kilpa-auto on otettu mukaan, jotta voidaan nähdä ero sarjatuotanto- ja kilpa-
auton välillä.



Kuva 15. Vertailu jarrujärjestelmän tehokkuudesta suhteessa auton painoon

2.11 Kitkaherkkyys

Kitkaherkkyys (kuva 16) määrittelee sen, miten jarrujärjestelmän sisäinen välityssuhde riippuu kitkakertoimesta jarrulevyn tai rummun ja kitkapalan välillä. Kitka eli liikevastus on normaalivoiman ja kitkavoiman suhdeluku, joten mitä pienempi ero voimien välillä on, sitä suurempi on kitkakerroin. Kitkakertoimeen vaikuttaa useat eri syyt, kuten koskettavien materiaalien kemiallinen koostumus, pintojen rakenne, ilmankosteus, liukunopeus, pintapaine ja lämpötila.



Kuva 16. Kitkaherkkyys eri jarrutyypeillä [3, s. 22]

Suuresta kitkaherkkyydestä on se haitta, että pienetkin erot kitkapintojen välillä johtavat erisuuruisiin jarruvoimiin ja sitä kautta jarrujen puoltamiseen. Lisäksi mikäli jarrut kastuvat, laskee jarruvoima rajusti ja tämä saattaa antaa turvattoman tunteen kuljettajalle, koska jarrujärjestelmän vastaavuus kuljettajan toivomuksiin ei ole looginen eri olosuhteissa. Vaikka rumpujarruissa suurempi välityssuhde johtaakin suurempaan kitkaherkkyyteen, voidaan rumpujarruja silti turvallisesti käyttää vielä nykypäivänä auton taka-akselilla, missä kitkaherkkyydellä ei ole niin suurta merkitystä kuin etuakselilla. [3, s. 22.]

2.12 Jarruäänet

Jarruäänet syntyvät yleensä jarrukomponenttien tai osakokonaisuuksien värähtelystä. Vaikka jarruääniä tutkitaan paljon, ei kaikkia värähtelyn syntymekanismeja pystytä aina täysin ennakoimaan suunnittelu- ja testivaiheessa. Kuljettajalle äkillisesti ja kiusallisesti ilmenevä jarruääni saattaa aiheuttaa epätietoisuutta tai jopa paniikin, koska jarrujärjestelmä on yleisesti pidetty auton tärkeimpänä turvallisuuteen liittyvänä ominaisuutena.

2.12.1 Jarruäänien syntyminen

Jarruäänet syntyvät pyöräjarrussa, ja useimmiten syynä on lika ja epäpuhtaudet, jotka aiheuttavat värinää kitkaparien välillä tai hankaavaa ääntä. Jarruäänien syntymiseen voidaan vaikuttaa myös jarrujärjestelmän suunnittelulla ja yksi merkittävimmistä jarruäänien syntymiseen vaikuttavista tekijöistä on kitkakerroin. On selvästi havaittu, että matalampi kitkakerroin jarrupalassa on turvallisempi valinta, mikäli halutaan ehkäistä jarruäänien syntymistä. [3, s. 56.]

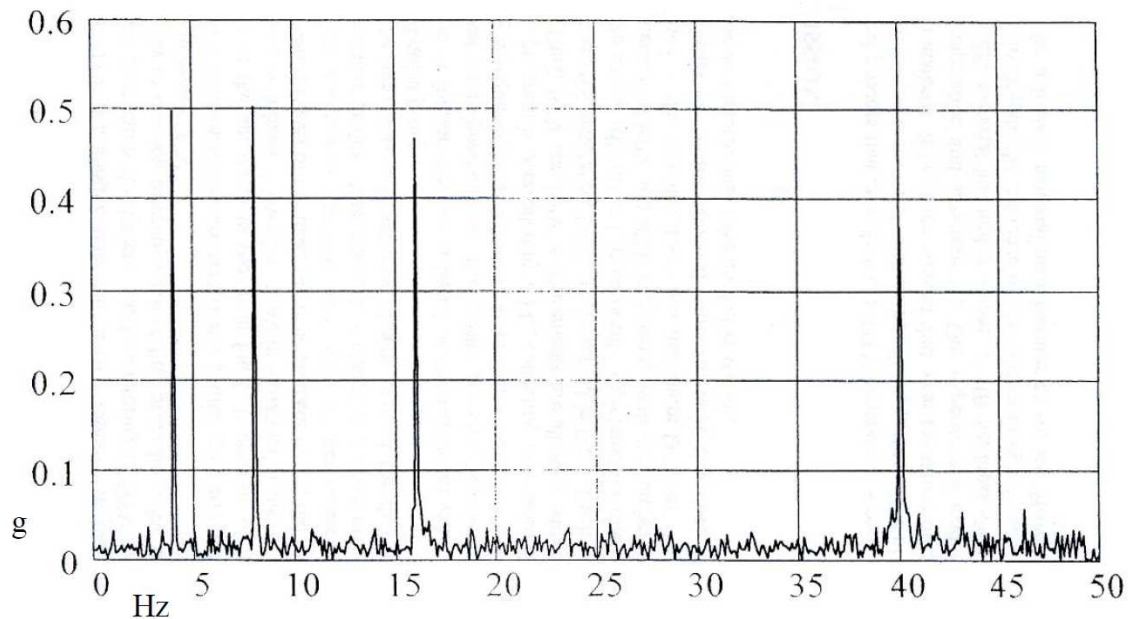
Seuraava lähes yhtä merkittävä tekijä jarruäänien syntymisessä on jarrupalan ja levyn välisen paineakeskipisteen sijainti. Paineakeskipisteen sijaintiin voidaan vaikuttaa suunnitteluvaiheessa. Epäonnistuneen suunnittelun synnyttämiä jarruääniä ei voida enää vähentää millään tavalla, koska jarruäänet syntyvät mekaanisesti. Koska äänet syntyvät värähtelystä, voidaan valita materiaaleja, joilla on parempi elastisuus ja vaimennuskyky. Esimerkiksi jarrulevyssä korkea hiilipitoisuus olisi toivottavaa, mutta toisaalta hinta kasvaa hiilipitoisuuden myötä. Myös valmistuksessa muodostuneet toleranssivirheet saattavat aiheuttaa jarruäänien syntymistä. [3, s. 56.]

2.12.2 Jarruäänityypit

Jarruäänityypit voidaan jakaa kolmeen eri tyyppiin: matalataajuusvärinä, jarrujen valitus ja jarrujen vinkuminen.

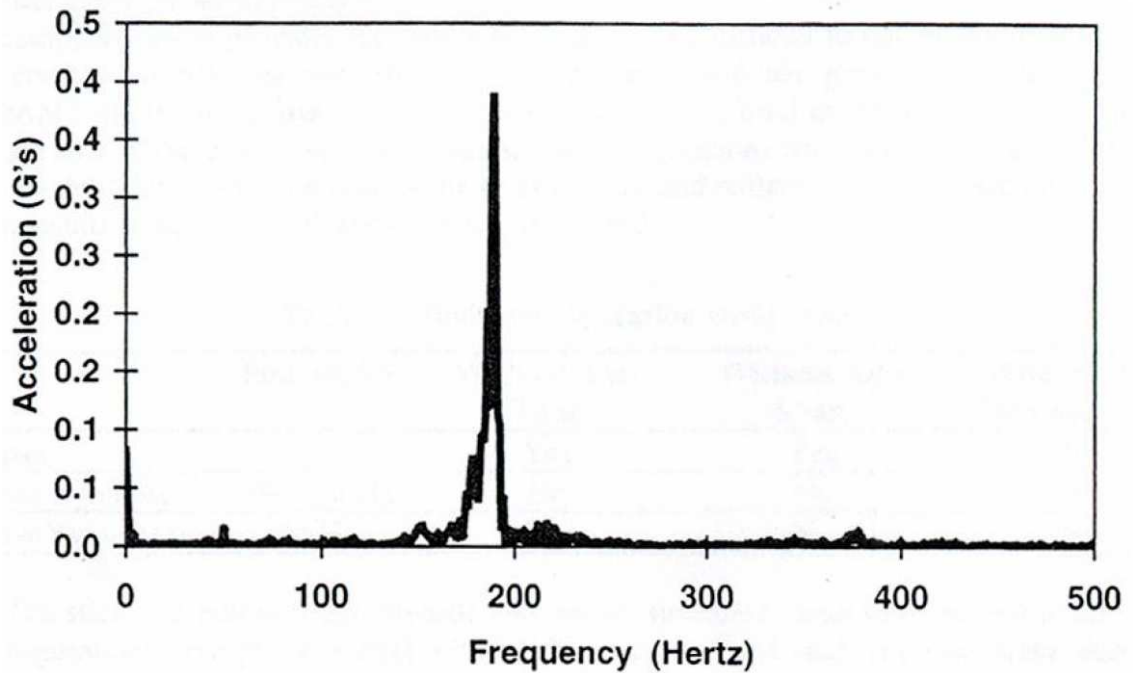
Matalataajuusvärinä syntyy yleisesti joko levyn epätasaisesta kulumisesta (kylmävärinä) ja jarrupalaan syntyneistä mikroskooppisista kuopista (kuumavärinä). Matalataajuusvärinää ilmenee yleisesti taajuusalueella 5–100 Hz, mutta useimmiten se esiintyy 10–50 Hz:in alueella, kuten kuvasta 17 voidaan nähdä. Parhaiten matalataajuusväräh-

telyn tuntee ratin, jarrupolkimen tai korin välityksellä painaessa jarrua. Rattiin välittyvä värähtely on seurausta kitkapintojen tangentialisen voiman muutoksista, joten siihen vaikuttaa myös ohjausgeometria. Jarrupolkimeen välittyvä värähtely on taasen seurausta kitkapintojen aksiaalissuunnassa olevien voimien muutoksista, jotka välittyvät jarrupolkimelle hydraulipiirin välityksellä. Yleisesti matalataajuusvärinää ilmenee sitä helpommin, mitä kuluneemmat kitkapinnat ovat. [3, s. 57.]



Kuva 17. Matalataajuusvärinän taajuusspektri [3, s. 57]

Jarrujen valitus on usein seurausta pyörännavan ja siihen mekaanisessa yhteydessä olevien osien kuten jarrupalojen värähtelyherkkydestä. Valitus on tyypillisesti ihmisenkin kuultavaa matalaa ääntä, joka ilmenee matalilla ajonopeuksilla ja pienillä jarruvoimilla. Ääni kehittyy yleensä yksittäisestä värähtelystä taajuusalueella 180–200 Hz, kuten kuvasta 18 voidaan nähdä. On kuitenkin mahdollista, että taajuudet nousevat jopa 1000 Hz:iin asti ja taajuuksilla on tapana resonoida pyöränripustuksen osien kanssa, jolloin äänen voimakkuus kasvaa. Jarrujen valitusta voidaan havaita niin uusilla kuin käytetyillä jarrukomponenteilla ja ajettaessa eteenpäin tai peruuttaessa. [3, s. 58.]



Kuva 18. Jarrujen valituksen taajuusalue [3, s. 58]

Jarrujen vinkuminen on myös erittäin yleinen ja kiusallinen jarruääni. Tyypillisesti sitä ilmenee taajuusalueella 1000–16 000 Hz, joka on jarrukomponenttien ominaistajuusalue. Jarrujen vinkumista voidaan eliminoida erilaisilla värähtelyvaimentajilla, mutta vinkuvaa ääntä saattaa syntyä, mikäli pieni kivi menee jarruasetelmaa suojaavan jarrukilven ja jarrulevyn väliin. Tämä saattaa helposti aiheuttaa vinkuvan ja häiritsevän äänen, ja yleisesti ääni häviää kun kivi kuluu hankauksesta ja tippuu välistä pois. [3, s. 59.]

2.13 Jarrujen häipymisilmiö

Jarrujen häipymisilmiö on seurausta jarruvoiman alentumisesta vaikka jarrupoljinvoima pysyykin vakiona. Jarrujen häipymistä ilmeneekin kaikissa ajoneuvoissa, joissa käytetään kitkajarruja. Yleisin syy on kitkapintojen kitkakertoimen aleneminen, mutta muita yleisiä syitä jarrujen häipymiseen ovat myös liiallinen lämpökuorma jarrukomponenteille tai hydraulipiirin vuoto. Yleisesti jarrujen häipymistä ilmenee, mikäli jarruja kuormitetaan poikkeuksellisen paljon. Tällöin jarrunesteen hygroskooppisista ominaisuuksista johtuen jarrunesteen kiehumispiste saatetaan ylittää, jolloin jarrunesteeseen syntyy pieniä ilmakuplia, jotka jarrupoljinta painaessa menevät kasaan ja poljin painuu sy-

vemmälle kuin normaalisti. Tähän voidaan vaikuttaa vaihtamalla jarruneste riittävän usein, jolloin jarruneste on mahdollisimman puhdasta. [3, s. 55.]

Jarrujen häipyminen voidaan jakaa kolmeen eri häipymisilmiöön:

- lämpö-häipyminen: jarruvoima muuttuu lämpötilan funktiona
- liuku-häipyminen: kitkakerroin muuttuu nopeuden funktiona
- paine-häipyminen: kitkankehitys muuttuu paineen funktiona.

3 Jarrujärjestelmän mitoitusprosessi

3.1 Jarrujärjestelmän suunnittelu

Jarrujärjestelmän mitoitusprosessiin sisältyy suunnittelu, mitoittaminen ja testaus. Suunnittelu alkaa aina asettamalla lähtökohdat ja raja-arvot. Mikäli suunnittelua tehdään asiakkaalle, saattaa asettaa asiakas rajat suunnittelulle. Lähtökohdaksi voidaan esimerkiksi asettaa tiettyyn segmenttiin sijoittuva henkilöauto, ja raja-arvot voivat muodostua mm. auton pakkauksesta. Kun tiedossa on lähtökohta, raja-arvot ja kustannukset, voidaan suunnitteluprosessille määrittää aikataulu. Suunnittelun aloittamisen ja massatuotannon välillä on yleisesti n. 3 - 4 vuoden väli.

Tuotekehitysprosessissa prototyypimallia seuraa tuotantomalli ja tämä pätee myös jarrujärjestelmän suunnittelussa. Ennen prototyypimallia on kuitenkin selvitettävä kaikki vaihtoehdot ja vertailtava näiden ominaisuuksien soveltuvuutta käytettävään kohteeseen. Jarrujärjestelmän suunnittelussa on otettava huomioon lukuisia erilaisia asioita [1, s. 19]:

1. **Luotettavuus:** Sellainen jarrujärjestelmä mihin ei voi luottaa, aiheuttaa riskin onnettomuudelle. Luotettavuus syntyy esimerkiksi hyvästä suunnittelusta, insinöörietiikasta ja syvällisestä testauksesta.

2. **Mitoittaminen:** Komponenttien oikea mitoittaminen on avain jarrujärjestelmän oikeaoppiselle toiminnalle.
3. **Turvallisuus ja vastuu:** Jarrujärjestelmän pitää olla turvallinen käyttää. Suunnittelijan pitää olla selvillä jarrujärjestelmän ergonomiasta ja turvallisesta normaalikäytöstä, mutta lisäksi pitää ottaa myös huomioon mahdolliset kolaritilanteissa tapahtuvat ajoneuvon rakennemuodonmuutokset.
4. **Materiaalivalinnat:** Kustannusten lisäksi on mietittävä kestävyyttä, painoa, kulumista, viimeistelyä ja suorituskkyä.
5. **Pintojen viimeistely:** Käyttölaitteiden pitää olla turvallisia käyttää myös kuluneina.
6. **Pakkaus:** Jarrujärjestelmän valmistusprosessi, huollettavuus ja tarkastukset.
7. **Varoitukset:** Äänimerkit ja varoitusvalot voivat olla merkinä huollon tarpeesta tai järjestelmän epäkunnosta.
8. **Ikääntyminen:** Jarrukomponenttien ikääntyessä, pitää olla selvillä mikä on niiden suorituskky käytettynä, jotta järjestelmä pysyy turvallisena.
9. **Vika-analyysit:** Suunnittelijan pitää suorittaa jarrujärjestelmälle testausta siten, että komponenttien vikaherkkyys löytyy ja vikojen vaikutusta voidaan myös samalla analysoida. Lisäksi testauksella löydetään mahdolliset suunnitteluvirheet.
10. **Turvallisuus standardit:** Standardit määrittelevät jarrujärjestelmälle asetetut minimivaatimukset toiminnan suhteen.

Jarrujärjestelmää suunniteltaessa on muistettava, että suunnittelu pohjautuu aina niimensä mukaisesti järjestelmän suunnitteluun. Tällöin pienikin muutos järjestelmässä voi vaikuttaa merkittävästi järjestelmän toimintaan. Esimerkiksi takajarrulevyn halkaisijan suurentaminen, jotta jarrupalan toimintaikä olisi pitempi ja jarruvoima suurempi, voi aiheuttaa riskin takajarrujen ennenaikaiseen lukkiutumiseen jarrutustilanteessa.

3.2 Kuluttajan toivomukset jarrujärjestelmän suhteen

Perinteinen kuluttaja joka ostaa auton, tuntee jarrujärjestelmän toiminnan kolmella eri tavalla.

1. jarrupoljinvoima ja sen lineaarisuus
2. jarrupolkimen liikematka
3. auton saavuttama hidastuvuus.

Edellä mainittujen kolmen toiminnan lisäksi kuluttaja tuntee myös jarrujen toimintaherkkyyden. Tavanomaisessa autossa, jossa käytetään kaksiosaisia liukutyyppejä jarrusatuloita, on jarrujärjestelmässä matalampi toimintaherkkyys, koska jarrusatulan kaksiosaisuudesta johtuen jarrusatula joustaa melkoisesti. Tämä tuntuu kuluttajalle matalana toimintaherkkyytenä ja toisaalta käyttömukavuutena. Toisaalta urheilullisissa autoissa ja kilpa-autoissa käytetään yksiosaisia jarrusatuloita, koska rakenteensa ansiosta yksiosainen jarrusatula joustaa vähemmän ja on herkempi reagoimaan jarrutuksen alussa. Kuluttajalle on myös tärkeää, että auton hidastuvuus suhteessa jarrupoljinvoimaan on lineaarista, jotta jarrujärjestelmän toiminta jarrutustilanteessa on loogista. Jarrujärjestelmää suunniteltaessa on siis tiedettävä mikä tulee olemaan auton käyttötarkoitus ja sitä kautta mitkä ovat vaatimukset jarrujärjestelmän suhteen. Vain näin voidaan varmistua että jarrujärjestelmä tulee vastaamaan kuluttajan toivomuksia. [13]

Rudolf Limpertin kirjoittamassa kirjassa Brake Design and Safety luetellaan hyvä lista lähtökohdista, jotka on asetettava jarrujärjestelmää suunniteltaessa [1, s. 32]:

1. Jarrujärjestelmän tehokkuus
 - a. Auton saavuttama maksimihidastuvuus suoralla renkaat lukkiutumatta
 - b. Kaavio jarrupaineista hidastuvuuden funktiona
 - c. Kaavio poljinvoimasta hidastuvuuden funktiona
 - d. Jarrutehostimen tehokkuus

2. Jarrujärjestelmän suorituskyky

- a. Maksimihidastuvuus suoralla renkaat lukkiutumatta, matalalla ja korkealla kitkakertoimella, molemmat suoritettuna auto kevyesti ja täysin kuormattuna
- b. Maksimihidastuvuus mutkassa renkaat lukkiutumatta matalalla ja korkealla kitkakertoimella, molemmat suoritettuna auto kevyesti ja täysin kuormattuna

3. Jarrutusmatka, auto kevyesti ja täysin kuormattuna

- a. Pisin jarrutusmatka renkaat lukkiutumatta
- b. Pisin jarrutusmatka renkaat lukkiutumatta ilman, että auton hallinta katoaa, kuivilla ja märillä jarruilla, sekä kylmillä ja lämpimillä jarruilla
- c. Pisin jarrutusmatka renkaat lukkiutumatta ajettaessa mutkaan

4. Jarrujärjestelmän viiveet

- a. Jarrutehostimen viive

5. Vika-analyysit

- a. Jarrutuksen tehokkuus, jos jarrupiirissä on vuoto
- b. Jarrutuksen tehokkuus, jos jarrutehostin on osittain tai kokonaan vioittunut
- c. Jarrutuksen tehokkuus, jos ilmenee lämpötilasta johtuvaa jarrujen häipymistä
- d. Auton hallintakyvyn säilyminen, jos jarrupiirissä on vuoto
- e. Jarrupolkimen liikematkan lisääntyminen, jos jarrupiirissä on vuoto

- f. Jarrupoljinvoiman lisääntyminen, jos jarrupiirissä on vuoto

6. Jarrunesteen tilavuuden analyysi

- a. Pääsylinterin männän halkaisija ja liikematka jokaiselle jarrupiirille
- b. Jarrusatulan männän halkaisija ja liikematka etu- ja taka-akselille

7. Lämpötila-analyysit

- a. Lämmönsiirtokerroin jarrulevyille tai rummulle
- b. Jarrulämpötilat jatkuvassa ja toistuvassa jarrutuksessa sekä maksimitehokkuustesteissä
- c. Jarrutehokkuus-analyysi kun jarrutusteho on heikentynyt lämpötilasta johtuen
- d. Lämpörasitus-analyysi, jotta voidaan eliminoida jarrulevyjen halkeilu
- e. Jarrunesteen lämpötilat jarrusatuloissa, jotta vältytään jarrunesteen kiehumiselta

8. Seisonta- ja hätäjarru

- a. Maksimihidastuvuus, joka saavutetaan seisonta- tai varajarrulla tasamaalla ja mäessä
- b. Maksimimäenjyrkkyys, jossa seisontajarru pitää auton paikallaan
- c. Määritykset sille, missä olosuhteissa varajarrujarru kytkeytyy automaattisesti

9. Tarkennetut määritykset suunnittelun kannalta

- a. Lämmönsiirto jarrulevyssä tai rummussa

- b. Jarrupalojen tai kenkien absorboima teho
- c. Jarrupalojen tai kenkien pintapaine ja kestoikä

10. Olosuhteista riippuvat tekijät

- a. Määritykset, miten huollot tai huoltamisen puute voivat aiheuttaa komponenttien uudelleensuunnittelua, jotta saavutetaan riittävä suorituskyky ja elinikä
- b. Määritykset, miten käyttöolosuhteet vaikuttavat jarrujärjestelmän komponentteihin
- c. Määritykset, miten kuluneisuus ja komponenttien ikä vaikuttaa takajarruihin ja sitä kautta jarruvoimanjakoon ja auton stabiliteettiin

11. Jarrukomponenttien mitoitus

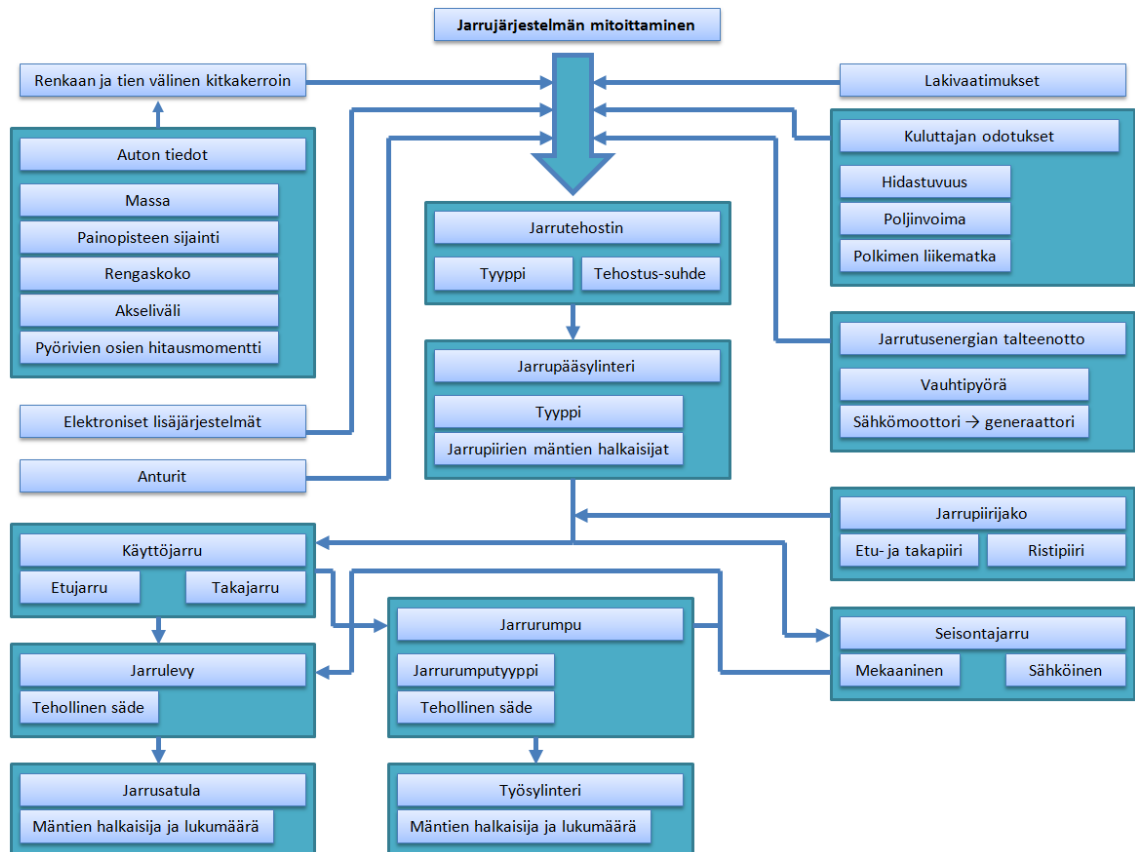
- a. Pohjautuen väsymiseen
- b. Pohjautuen ylikuormittamiseen

12. Turvallisuusstandardit

- a. Paikalliset standardit
- b. Ulkomaiden standardit
- c. Teollisuuden standardit
- d. Kuluttajien odotukset ja rajoitukset.

3.3 Mitoitusprosessi

Mitoitusprosessin (kuva 19) avulla pyritään määrittämään jarrukomponenttien teholliset mitat. Vaikka nykypäivän autojen jarrujärjestelmät sisältävätkin elektronisia lisäjärjestelmiä, kuten hätäjarrutehostin ja mäkilähtöavustin, perustuu jarrukomponenttien tehollisten mittojen määrittäminen fysiikan lakeihin.



Kuva 19. Jarrujärjestelmän mitoituksen prosessikaavio

Jarrujärjestelmän mitoitus voidaan tehdä eri menetelmillä ja mitoitukseen voidaan kehittää ohjelmia, jotka laskevat annettujen parametrien ja fysiikan lakien mukaan jarrujärjestelmän teoreettisen soveltuvuuden kyseiseen autoon. Samalla voidaan myös arvioida teoreettista suorituskykyä. Alla esitellään kaksi erilaista tapaa lähestyä mitoittamista. Kummallakin menetelmällä päädytään samaan lopputulokseen.

Ensimmäinen tapa on valita jarruvoimajako etu- ja takapyörien välille eli miten paljon jarruttavaa momenttia syntyy etu- ja takapyörillä. Optimaalinen jarruvoimajako kun on auton mittojen ja painojoen suhde. Seuraavaksi valitaan sopiva jarrupääsylinteri, josta

voidaan siirtyä valitsemaan sopivalla halkaisijalla olevat jarrulevyt tai jarrurummut, joilla pitää olla riittävä lämpöenergiainsitomiskyky ja kulumispinta sekä tuottavat mahdollisimman vähän jarruääniä. Jarrulevyn, tai jarrurummun maksimimitat määrittelee ainoastaan käytetty vanne koko. Viimeisessä vaiheessa suunnitellaan poljinasetelma ja jarrutehostin.

Toinen tapa, minkä olen itse todennut mielekkääksi ja toimivaksi, on edetä asian suhteen toisessa järjestyksessä. Ensin asetetaan tavoiteltu maksimijarrupoljinvoima, millä toivotaan saavutettavan maksimihidastuvuus, kun tien ja renkaan välillä vallitsee maksimikitka. Samalla voidaan asettaa jarrupolkimelle sopiva vipusuhde. Tämän jälkeen valitaan sopivat pääsylinteri ja jarrusylinterit sekä jarrulevyjen tai jarrurumpujen halkaisija. Kun tiedossa on auton muut mitat, voidaan helposti laskea pyörämomentit, jotka suunniteltu jarrujärjestelmä saavuttaa ja toisaalta minkä jarrumomentin auto tarvitsee, jotta pyörät lukkiutuvat. Paras renkaan pitkittäispito saavutetaan pidon ja lukkiutumisen rajamailla, kun renkaassa on olosuhteista riippuen luistoa n. 10-20 % [7, s. 584].

Kummassakin mitoitusmenetelmässä on otettava huomioon käytettävä hydraulipiirityyppi, joista suosituin lienee tyyppi, jossa etuakseli ja taka-akseli on jaettu omaan hydraulipiiriinsä ja näihin tuotetaan paine pääsylinterin avulla. Toinen suosittu piirityyppi on jako ensiö- ja toisiopiiriin. Ensiöpiiriin kuuluu vasemman etupyörän ja oikean takapyörän pyöräjarru ja toisiopiiriin oikean etupyörän ja vasemman takapyörän pyöräjarru. Näissä suurin ero mitoituksen kannalta tulee siinä, että ristipiiriä käytettäessä ei voida käyttää erikokoisia mäntiä pääsylinterissä, kuten etu- ja takapiirijakoa käytettäessä voidaan tehdä.

3.3.1 Käyttöjarrun komponenttien teholliset mitat

Käyttöjarrun mitoittamisella tarkoitetaan jarrukomponenttien oikeita dimensioita, jotta jarrujärjestelmä sekä täyttäisi lain vaatimukset, mutta myös olisi turvallinen ja miellyttävä käyttää kuljettajan kannalta.

Henkilöauton jarrujärjestelmän mitoittaminen voidaan jakaa komponenttien mitoittamiseen ja lämpökuormien simulointiin. Komponenttien mitoittamisella tarkoitetaan jarru-

järjestelmän eri osien, kuten jarrupääsylinterin, jarrusatuloiden, jarrulevyjen ja jarrupolkimen toiminnallisuuteen vaikuttavien mittojen teoreettista laskentaa. Lisäksi voidaan mitoittaa eri komponenttien kestoikää ja huollon tarvetta.

Käyttöjarrussa on mitoitettavat seuraavat suureet:

- haluttu maksimijarrupoljinvoima
- jarrupolkimen välityssuhde
- jarrupääsylinterin halkaisijat jarrupiireille
- jarrutehostimen tehostusvaikutus
- jarrusatuloiden mäntien halkaisija ja lukumäärä (etu/taka)
- jarrulevyn tehollinen säde (etu/taka).

Lämpökuormien simuloinnilla tarkoitetaan henkilöauton kineettisen energian muuttumista lämpöenergiaksi ja sitä miten eri komponentit käyttäytyvät altistuessaan useasti erilaisille lämpökuormille erilaisissa jarrutustilanteissa ja sääolosuhteissa. Lämpöenergia muodostuu kitkasta jarrulevyn tai jarrurummun ja kitkapalan välillä. Tästä lämpöenergiasta on toivottavaa, että suurin osa siirtyisi konvektoimalla eli jäähdytys tapahtuisi suoraan ilmaan. Todellisuudessa kuitenkin pieni osa lämpöenergiasta siirtyy säteilemällä ympärillä oleviin pintoihin, sekä johtumalla kontaktipinnoista. Nämä kaksi viimeistä eivät kuitenkaan hyvin suunnitellussa järjestelmässä tuota ongelmia.

3.3.2 Käyttöjarrun kitkapintojen käyttöikä

Autoteollisuudessa yleisesti käytettävä ohje käyttöjarrun kitkapintojen kulumisen suhteen on seuraava: jarrulevyn tai rummun tulisi kestää 2 - 3 jarrupala- tai jarrukenkä-sarjaa, kunnes levy tai rumpu on vaihtokunnossa [1, s. 49].

Ennen kun pystytään laskemaan jarrupalan kitkapinnan kestoikä, pitää laskea yhden jarrutustapahtuman luistotyö:

$$W = \frac{t * (\omega_0 * M_{max})}{2}$$

t = luistovaiheen kesto (h)

ω_0 = kytkentäkulmanopeus (rad/s)

M_{max} = jarrutusmomentti (Nm)

Kitkapintojen kestoikä voidaan laskea, kun tiedetään jarrutusten kokonaislukumäärä:

$$X = \frac{z * A * \delta}{W * k}$$

z = kitkapintojen lukumäärä (kpl)

A = kitkapinnan pinta-ala (cm³)

δ = kulumisvara (cm)

k = kulumisnopeus (cm³/kWh)

W = yhden jarrutustapahtuman luistotyö (kW)

Mikäli kestoikä halutaan muuttaa ajosuoritteeksi (km), on tiedettävä ajoluonne. Esimerkiksi jarrutuksia keskimäärin 5 kpl/km ja kestoikä 100000 jarrutusta.

$$\text{Huoltoväli } S = \frac{100\,000 \text{ kpl}}{5 \text{ kpl/km}} = 20\,000 \text{ km}$$

$$\text{Kalenteripäivinä } H = \frac{20\,000 \text{ km}}{40 \text{ km/pv}} = 500 \text{ päivää}$$

3.3.3 Seisontajarrun komponenttien teholliset mitat

Seisontajarrun mitoitus on yksinkertaisempaa kuin käyttöjarrun. Seisontajarrun pitää pystyä tuottamaan riittävästi vastamomenttia pyörillä, jotta auto pysyy pysäköidessä

paikallaan, sijaitsi auto sitten tasaisella alustalla tai kaltevalla alustalla. Vaatimuksena on myös, että auto pysyy paikallaan tarvittaessa myös pitempiä aikoja, eli seisontajarru pitää pystyä lukitsemaan pysyvästi ja turvallisesti paikalleen. Lisäksi seisontajarrulla pitää tarvittaessa pystyä hidastamaan auton liike, mikäli käyttöjarru menee epäkuntoon.

3.3.4 Pyöräjarrun lämpötilamuutokset

Kitkajarruissa syntyvä liike-energian muutos lämpöenergiaksi on erittäin haastavaa määrittää. Jarrujärjestelmälle on ehdottoman tärkeää, että se pystyy absorboimaan kaiken lämpöenergian tiettyyn pisteeseen asti ilman että jarrujärjestelmän toiminta muuttuu epävakaaksi. Tämä piste voidaan arvioida teoreettisella tasolla erittäin tarkasti käyttämällä FEM simulointia, mutta tämä vaatii, että pyöräjarrusta luodaan matemaattinen simulaatiomalli, joka sisältää täydellisen 3D-mallin pyöräjarruista ja sen ympärillä olevista komponenteista.

Pyöräjarrun lämpötilan muutosta jarrutuksessa voidaan myös laskea karkeasti fysiikan perusteiden avulla. Seuraavaksi on laskettu yksinkertainen esimerkki siitä, jos auton vauhti pudotetaan jarruttamalla nopeudesta 120 km/h nopeuteen 80 km/h. Tässä esimerkissä oletetaan, että 90 % liike-energiasta muuttuu lämpöenergiaksi jarrujärjestelmän kitkamuodostuksen ansiosta. Dynaamisen painonsiirron myötä oletetaan, että jarruvoimajako etuakselille on 70 %, josta puolet jakautuu yhtä etujarrulevyä kohden. Auton paino on 1650 kg ja yksi etujarrulevy painaa 10 kg. Jarrulevyn materiaaliksi oletetaan teräs, jonka lämmönjohtokyky oletetaan olevan $460 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$.

Liike-energian muutos

$$\Delta E_k = E_{ka} - E_{k1}$$

$$\Delta E_k = \frac{1}{2}mv_a^2 - \frac{1}{2}mv_1^2$$

$$\Delta E_k = \frac{1}{2}m(v_a^2 - v_1^2)$$

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} 1650 kg \left[\left(\frac{120}{3,6} m/s \right)^2 - \left(\frac{80}{3,6} m/s \right)^2 \right]$$

$$\Delta E_k = 509259 J \approx 509 kJ$$

Tästä kokonaisenergiämäärästä aluksi 90 % muuttuu lämpöenergiaksi

$$\Delta E_{\text{lämpö}} = 509259 J * 0,9 \approx 458333 J$$

Tästä lämpöenergiasta 70 % jakautuu etuakselille

$$\Delta E_{\text{etu}} = 458333 J * 0,7 = 320833 J$$

Tästä lämpöenergiasta vielä 50 % jakautuu yhdelle etujarrulevyille

$$\Delta E_{\text{etulevy}} = 320833 J * 0,5 = 160416 J \approx 160 kJ$$

Jarrulevyyn siirtyvä lämpöenergia voidaan lausua lämpötilan muutoksen avulla

$$Q = cm_j \Delta t$$

$$\Delta t = \frac{Q}{cm_j}$$

$$\Delta t = \frac{160416 J}{0,46 * 10^3 J/(kg * ^\circ C) * 11 kg}$$

$$\Delta t = 34,8 \approx 35^\circ C$$

Yhden etujarrulevyn lämpötila siis nousee jarrutuksessa 120 km/h -> 80 km/h 35 °C.

Lasku ei ota huomioon esim. jarrutuksessa tapahtuvaa konvektiota.

3.4 Auton ominaisuuksien vaikutus mitoittamiseen

Suunniteltaessa uutta autoa saattaa auton paino ja sitä myötä painopisteen korkeus vaihdella suunnittelun eri vaiheissa. Auton fyysisillä ominaisuuksilla onkin iso vaikutus komponenttien mitoittamiseen. Suunniteltaessa jarrujärjestelmää on oltava selvillä seuraavista auton tiedoista:

1. auton paino kuormattuna ja kuormaamattomana
2. staattinen painojako kevyesti ja täysin kuormattuna
3. akseliväli
4. painopisteen korkeus eri kuormaustilanteissa
5. ajoneuvon käyttötarkoitus
6. sähköavusteiset järjestelmät
7. vanteen ja renkaan koko
8. suunniteltu maksiminopeus
9. auton erityiset ominaisuudet
10. lainsäädäntö.

3.5 Auton pakkauksen vaikutus jarrujärjestelmän suorituskykyyn

Auton pakkaus ja kuormaus vaikuttavat merkittävästi auton ajo-ominaisuuksiin, näillä kun on suora vaikutus auton massaan ja painopisteen sijaintiin. On eri asia kuormata tavaraa auton tavaratilaan kuin asentaa auton katolle kuljetusboksi ja lastata se täyteen tavaraa. Jarrujärjestelmän toiminnan kannalta seuraavaksi esiteltävät tekijät ovat tulleet entistä merkittävimiksi luistonesto- ja ajonvakautusjärjestelmien myötä.

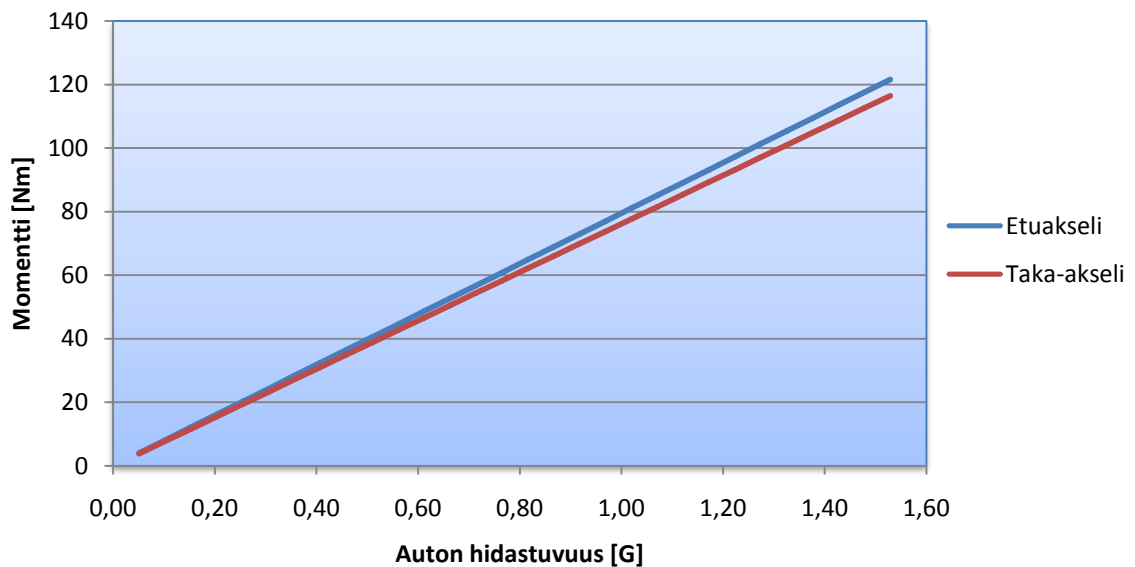
3.5.1 Massahitausmomentti

Autossa jarrujärjestelmään vaikuttavia hitausmomenteja tuottavat vanteet, renkaat ja jarrulevyt tai rummut, sekä tarvittaessa huomioon voidaan ottaa myös voimansiirron pyörivät osat. Pyöriessään nämä osat sisältävät massahitausmomentin (kuva 20), joka lisää jarrujärjestelmältä vaadittavaa suorituskykyä. Mitä kauempana massa on pyörimisakselistaan, sitä suurempi hitausmomentti kappaleella on. Jarrutuksessa mitä suurempi hitausmomentti renkaalla, vanteella ja jarrulevyllä on, sitä suurempi momentti tarvitaan pelkän pyörintäliikkeen hidastamiseen halutulla kulmahidastuvuudella. Jarrujärjestelmää mitoittaessa tämä on syytä ottaa huomioon, kun lasketaan jarruvoiman tarvetta, koska massahitausmomentilla on lisäävä vaikutus jarruvoiman tarpeelle. Massahitausmomentin suuruus voidaan määrittää laskennallisesti, mutta se nähdään myös 3D-mallinusohjelmalla, kun tiedetään kappaleen dimensiot, tilavuus ja materiaalin tiheys.



Kuva 20. Hitausmomentista muodostuva momentti, joka voidaan laskea kun tiedetään kappaleen kulmahidastuvuus

Perinteisessä autossa 1 G:n hidastuvuudella vanteiden, renkaiden ja jarrulevyjen massahitausmomentti lisää jarruttavan momentin tarvetta n. 80 Nm akselia kohden (kuva 21). Voidaan todeta, että massahitausmomentin vaikutus etu- ja taka-akselilla on lähes sama, koska yleisesti eroa syntyy ainoastaan kevyemmästä takajarrulevystä.



Kuva 21. Vanteiden, renkaiden ja jarrulevyjen massahitautsmomentista syntyvä momentti hidastuvuuden funktiona mitoitusesimerkin autossa

Hitausmomentilla on myös vaikutusta esimerkiksi luistonesto- ja ajonvakautusjärjestelmän toimintaan. Mitä suurempi hitausmomentti renkaalla ja vanteella on, sitä hitaammin nämä järjestelmät voivat reagoida renkaan pyörintäliikkeen jarruttamiseen ja vapauttamiseen.

3.5.2 Auton massa

Auton massalla on merkittävä vaikutus jarrujärjestelmältä vaadittavaan suorituskykyyn. Mitä suurempi on auton massa, sitä enemmän liike-energiaa (kuva 22) muuttuu jarrutuksessa lämpöenergiaksi ja sitä enemmän jarrujärjestelmältä vaaditaan suorituskykyä. Jarrulevyjen fyysinen koko määrääkin yleensä jarrujärjestelmän kyvyn sitoa lämpöenergiaa. Mikäli jarrulevyt suunnitellaan massaltaan liian pieniksi, saattaa jarrulevyjen lämpötila nousta niin suureksi, että lämpö ei ehdi haihtumaan, vaan lämpö siirtyy johdumalla esim. jarrunesteeseen, jolloin jarrutusnesteen kiehumispiste saattaa ylittyä.



Kuva 22. Auton liike-energian syntyminen

Mekaniikan energiaperiaatteen mukaan auton liike-energia on systeemin osien liike-energioiden summa. Käytännössä tämä tarkoittaa autossa etenemisen liike-energian lisäksi pyörien pyörimisliikkeen energiasta.

Auton liike-energioiden summa voidaan laskea seuraavasti:

$$E_K = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}J_v\omega_v^2 + \frac{1}{2}J_r\omega_r^2 + \frac{1}{2}J_j\omega_j^2$$

m = auton massa [kg]

v = auton nopeus [m/s]

J_v = vanteiden massahitausmomentti [kgm^2]

J_r = renkaiden massahitausmomentti [kgm^2]

J_j = jarrulevyjen tai rumpujen massahitausmomentti [kgm^2]

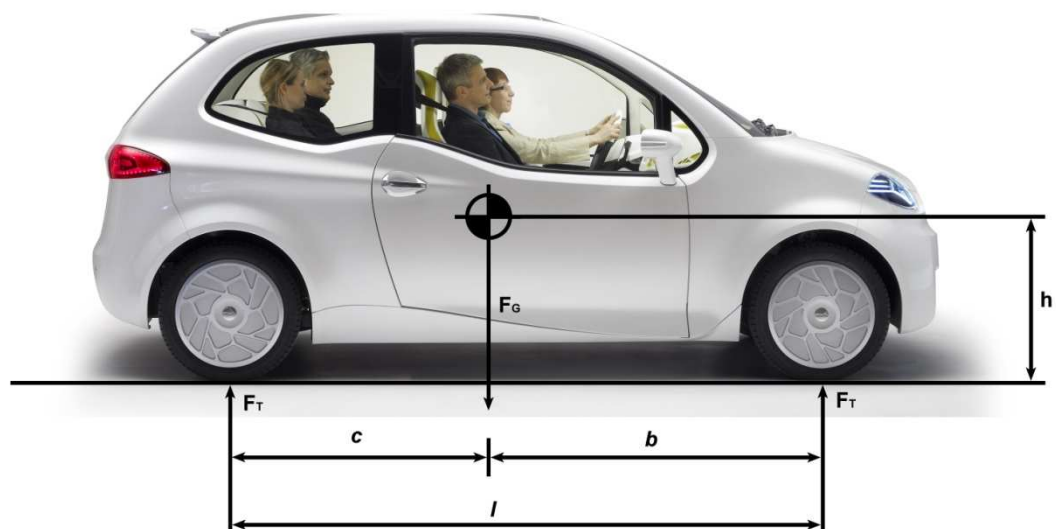
ω_v = vanteiden kulmanopeus [1/s]

ω_r = renkaiden kulmanopeus [1/s]

ω_j = jarrulevyjen tai rumpujen kulmanopeus [1/s]

3.5.3 Painopisteen sijainti

Painopisteen sijainti (kuva 23) vaikuttaa akselivoimien siirtymiseen jarrutuksessa. Staattisessa tilanteessa painojako on siis erilainen kuin dynaamisessa jarrutustilanteessa. Jos oletetaan, että tie ja kitka ovat homogeenisia ja painopiste sijaitsee auton keskikilinjalla, niin tällöin Newtonin II lain mukaisesti akselikuormien jako syntyy momenttina painopisteen kautta.



Kuva 23. Painopisteen sijainnin määrittäminen autossa

$$F_G = mg$$

g = putoamiskiihtyvyys (9,81 m/s²)

m = auton paino

l = akseliväli

h = painopisteen korkeus

F_T = akselikuorma (staattinen)

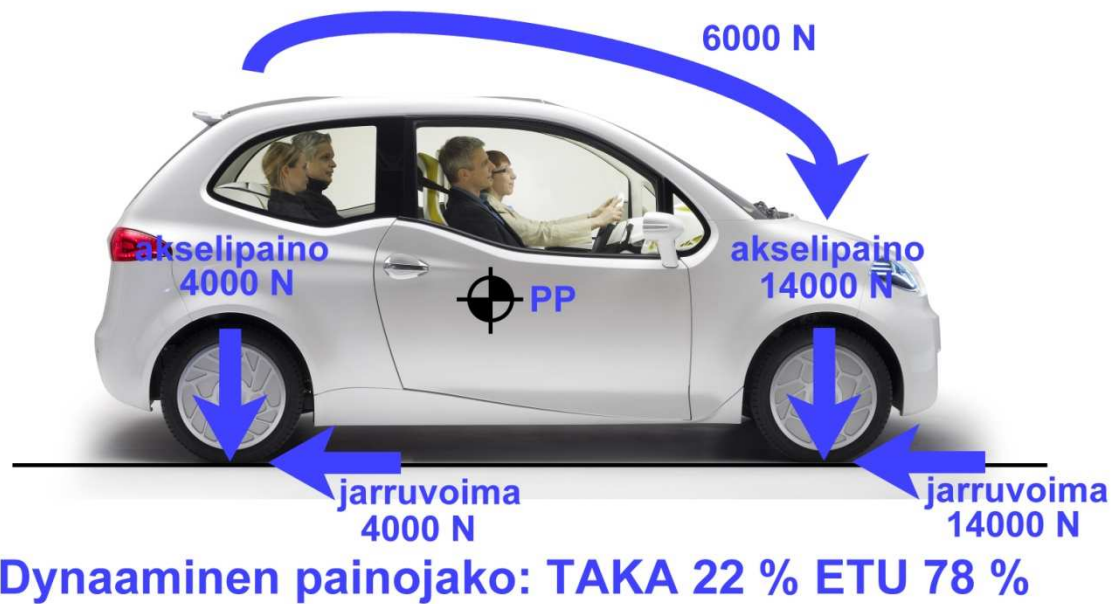
Staattisessa tilanteessa painojako (kuva 24) voidaan todeta punnitsemalla auto jokaisesta nurkasta samanaikaisesti ja kirjaamalla etu- ja taka-akselien painot.



Staattinen painojako: TAKA 56 % ETU 44 %

Kuva 24. Staattinen painojako

Dynaamisessa jarrutustilanteessa (kuva 25) painoa siirtyy siis momenttina painopisteen kautta etuakselille. Mitä korkeammalla painopiste sijaitsee, sitä enemmän jarruvoimaa etuakselilla tarvitaan ja sitä myötä taasen taka-akselilla vaadittava jarruvoima vähenee. Toisaalta myös mitä edempänä etuakselia painopiste sijaitsee, sitä enemmän edessä tarvitaan jarruvoimaa ja takana vähemmän.



Kuva 25. Dynaaminen painojako

Voidaan siis todeta, että painopisteen sijainti vaikuttaa merkittävästi jarrujärjestelmän toimintaan. Ottaen huomioon vielä sen, että painopisteen sijainti autossa muuttuu kuormauksesta riippuen, on painopisteellä merkittävä vaikutus ajo-ominaisuuksiin.

3.5.4 Rengaskoko

Rengaskoon muutosta säätelee laki, joten rengaskokoa ei voi mielivaltaisesti muuttaa suunnitellusta. Mitä suurempi on renkaan halkaisija, sitä suurempi jarruvoima tarvitaan akselilla. Rengaskoon muutos isompaan vaikuttaa myös massahitausmomentin lisääntymiseen ja ulkohalkaisijaan, jolloin luistonesto- ja ajonvakautusjärjestelmät eivät välttämättä toimi kuten alun perin on suunniteltu.

3.6 Jarrukomponenttien sijainti

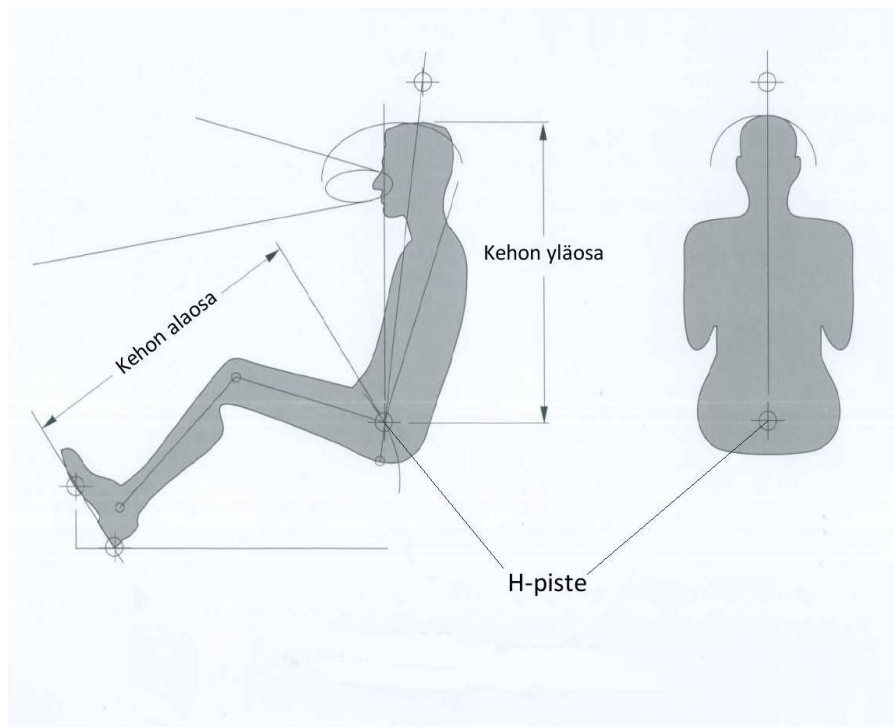
Jarrukomponenttien sijainnilla voidaan vaikuttaa esimerkiksi erilaisiin kustannuksiin, kuten valmistus- ja huoltokustannuksiin, joten yleensä jarrukomponenttien sijainti määräytyykin huollettavuuden ja muiden komponenttien sijainnin perusteella. Esimerkiksi jarrulevy on sijoitettu yleisesti pyörännapaan, koska siinä levyn jäähdytys toimii tehokkaimmin. Toisaalta edellä mainittu levyn sijainti mahdollistaa myös helpon huollattavuuden.

3.7 Hallintalaitteiden sijainti

Autoteollisuudessa kaikki ergonomiaan liittyvä suunnittelu perustuu H-pisteeseen ja mallinuken käyttöön. Nämä kumpikin ovat määritelty standardeissa, kuten myös monet muut auton sisätilojen pakkaukseen liittyvät asiat. Ideaalisinta olisi, jos auto pystyttäisiin suunnittelemaan sisältä ulos, jolloin autosta saataisiin ergonominen ja funktionaalinen. Yleensä kuitenkin auto suunnitellaan siten, että ensin määritellään sisätilojen rajat ulkorajat auton muotoilun myötä, ja se asettaa rajat esim. hallintalaitteiden sijoittamisen suhteen. [14, s. 88.]

3.7.1 H-piste

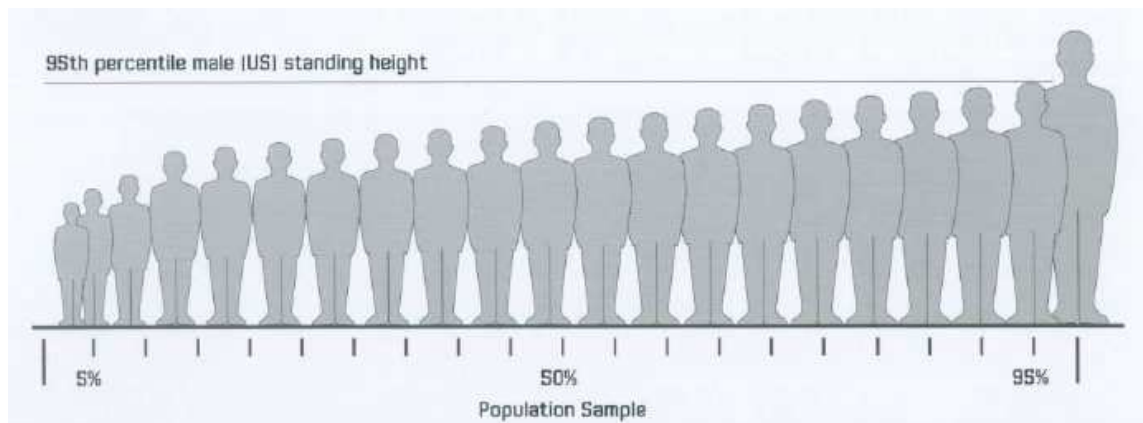
Referenssipisteenä käytetty H-piste (kuva 26) on ajoneuvon pakkauksen suunnittelussa tärkein elementti. H-piste tulee englanninkielestä H-point (Hip point). Samasta asiasta käytetään myös termiä SgRP, joka tulee englanninkielen sanoista Seating Reference Point eli suomennettuna istuma-asennon referenssipiste.



Kuva 26. H-pisteen määrittely [14, s. 89]

3.7.2 Mallinukke

Mallinukkeina 3D-mallintaessa käytetään useita erityyppisiä malleja. Yksi suosituimmista on kuitenkin SAE-standardin ”95th percentile male manikin”, joka vastaa fyysiseltä kooltaan (autossa istuma-asennossa) keskimäärin 97,5 prosenttia Yhdysvaltojen ihmisistä sisältäen niin miehet kuin naiset. Näin pystytään suunnittelemaan paremmin auto sisältä sellaiseksi, että se soveltuu valtaosalle maapallon ihmisistä. Prosessi etenee sitten, että ensin auton sisätilat (sisustan muotoilu, istuma-asento, ergonomia, näkökenttä, liikeradat, jne) suunnitellaan soveltumaan valtaosalle ihmisistä. Tämän jälkeen samalle paikalle voidaan asettaa pienempiä tai isompia mallinukkeja ja kokeilla sisätilojen soveltuvuutta niin kauan, että löytyy kompromissi turvallisuuden ja mukavuuden suhteen. Kuvasta 27 nähdään SAE-standardin mukainen pituustaulukko.



Kuva 27. SAE pituustaulukko [14,s. 88]

3.8 Poljinvoima, polkimen liikematka ja poljintuntuma

Sekä poljinvoima että polkimen liikematka ovat erittäin tärkeitä asioita suunnitellessa jarrujärjestelmää, koska kuljettajan pitää pystyä turvallisesti hallitsemaan jarrutuksen tehokkuutta. Jarrujärjestelmä voidaan suunnitella hallittavaksi joko poljinvoimalla tai polkimen liikematalla tai näitä yhdistelemällä. Liian lyhyt liikematka saattaa aiheuttaa liukkaalla pinnalla ajettaessa ennakoimatonta jarrujen lukkiutumista. Toisaalta myös liian pehmeä ja pitkä polkimen liikematka saattaa aiheuttaa lisääntyneen jarrutusmatkan lisäksi epävarman tunteen kuljettajalle.

3.8.1 Poljinvoima

Turvallisuusstandardit määrittelevät rajat maksimipoljinvoimalle. Suunnittelussa on otettava huomioon myös ergonominen näkökohta, joka määrittelee maksimi poljinvoiman ja polkimen liikematkan. Ihmisen saavuttama oikean jalan maksimipoljinvoima on naisilla keskimäärin 445 N:a ja miehillä 823 N:a [1, s. 7]. Asiaa voi helposti kokeilla seisomalla yhdellä jalalla ja käydä kyykyssä. Voima saadaan laskettua paino kerrottuna putoamiskiihtyvyydellä $9,81 \text{ m/s}^2$. Esimerkiksi 70 kg:n painoisella ihmisellä tämä onnistunut suoritus tuottaa n. 690 N:n voiman yhdellä jalalla.

3.8.2 Polkimen liikematka

Polkimen liikematkalla voidaan vaikuttaa niin ergonomiaan kuin turvallisuuteen. Liian pitkä jarrupolkimen liikematka aiheuttaa hätäjarrutuksessa turhaa viivettä, mutta toisaalta liian lyhyt liikematka saattaa synnyttää liian herkän jarrutuntuman. Polkimen painonopeus on kokeneilla kuljettajilla keskimäärin 1 m/s ja normaalin ajokokemuksen omaavilla n. 0,25 m/s. Polkimen 100 mm:n liikematkalle kuluukin ihmiseltä yleisesti n. 100–200 ms [1, s. 7].

3.8.3 Poljintuntuma

Poljintuntumaa voidaan mitata kahdella eri suureella: tarvittavalla poljinvoimalla ja polkimen liikematkalla, jotta saavutetaan tietty hidastuvuustavoite. Poljintuntuma onkin yleisesti subjektiivinen määritelmä, ja siitä on vaikea määritellä. Voidaan kuitenkin todeta, että jarrujärjestelmää hallittaessa kuljettajan on helpompi hallita jarrutuksen voimakkuutta voimalla kuin liikematkalla. Liian pitkä liikematka saattaa aiheuttaa kuljettajassa epäluottamuksen jarrujärjestelmään.

Toisaalta moottorin voimakkuutta on taas helpompi hallita liikematkalla kuin voimalla, yleisesti kun on totuttu siihen, että kaasupolkimen liikematka on melko pitkä ja tarvittava voima todella pieni.

3.8.4 Kengän koko

Jarrupolkimen dimensioita suunnitellessa on tärkeää ottaa huomioon, että poljinta pysyy painamaan erikokoisilla kengillä. Tämä on tullut varmasti monelle tutuksi, kun siirtyy kesäkengistä talvikenkiin. Poljinasetelmasta on varmasti syytä tehdä asianmukainen tilamalli, jossa selvitetään todellinen tilantarve ja mukavuus erityyppisillä ja -kokoisilla kengillä.

3.9 Riskianalyysi

Yleisimmät henkilöautoissa ilmenevät jarrujärjestelmäviat ovat jarrutusmatkan pidentyminen, pehmeä jarrupoljin tai jarrupolkimen painuminen pohjaan. Riskianalyysin tarkoituksena on tutkia jarrujärjestelmän toimivuutta ja suorituskykyä normaaleissa ajolosuhteissa, mikäli jarrujärjestelmän toiminnassa havaitaan seuraavia häiriöitä [1, s. 427]:

- jarrukomponenttien toiminta on puutteellinen
- jarrukomponentit ovat kuluneet liikaa
- jarrukomponentit ovat viallisia
- jarrukomponentit ovat mekaanisesti vaurioituneita.

Jarrujärjestelmässä syntyvän häiriön ilmetessä joihinkin tai kaikkiin alla oleviin kysymyksiin pitäisi määrittää vastaus [1, s. 474]:

1. Aiheuttaako häiriö auton hidastuvuuden alenemisen?
2. Syntyykö häiriö yhtäkkiä vai hitaasti kehittyen?
3. Aiheuttaako häiriö auton ajolinjaan muutoksia, esimerkiksi auto ei pysy ajokaisella jarrutuksen aikana?
4. Aiheuttaako häiriö jarrupoljinvoiman tai liikematkan lisääntymisen?

5. Ilmeneekö häiriö ajoittain, ja miten voidaan varmistaa häiriön olemassaolo tapahtumahetkellä?
6. Ilmeneekö merkkejä siitä, että kuljettaja voi huomata häiriön olemassaolon ennen onnettomuutta?
7. Pystyykö varajarrulla tuottamaan tarpeeksi suuren hidastuvuuden, jotta onnettomuudelta voidaan välttyä?

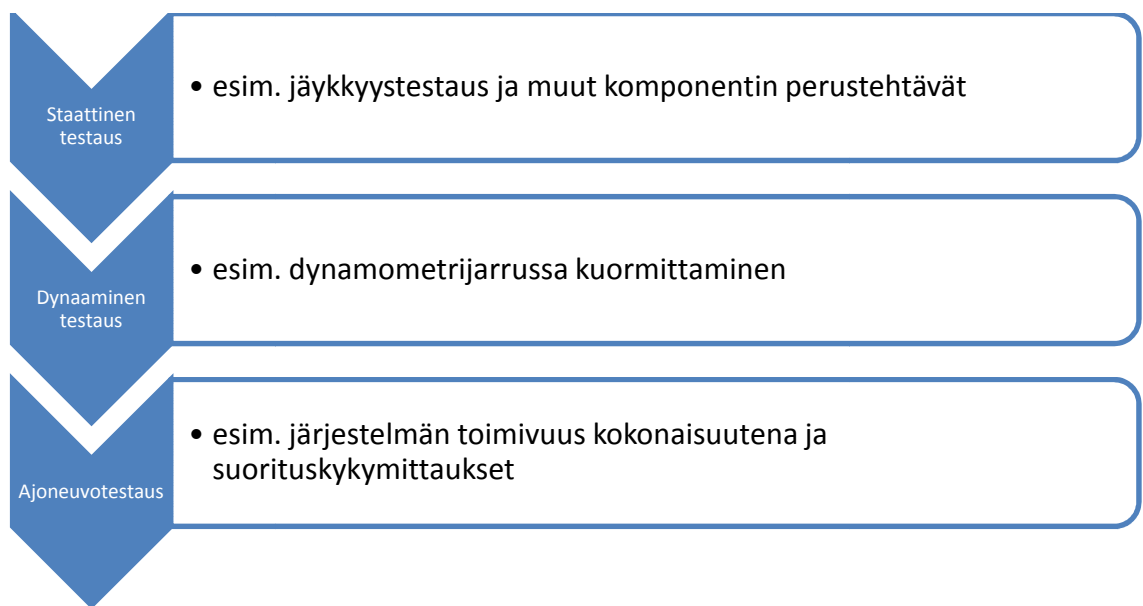
Riskianalyysi pitäisi tehdä kaikille jarrujärjestelmän komponenteille ja analysoida niissä ilmenneen häiriön vaikutusta jarrutustapahtumaan. Analyysiin pitää ottaa mukaan vähintään seuraavat tapaukset [1, s. 474]:

- Häiriö hydraulipiirissä: Määritys jarrujärjestelmän tuottaman osatehon tuottokyvylle häiriön ilmetessä.
- Auton hidastuvuuden alentuminen: Auton saavuttaman maksimihidastuvuuden avulla voidaan määrittää alentunut hidastuvuus eri häiriöiden ilmetessä.
- Jarrupoljinvoiman lisääntyminen: Määritys lisääntyneelle jarrupoljinvoimalle esimerkiksi jarrutehostinyksikön rikkoontuessa.
- Jarrupolkimen liikematkan lisääntyminen: Määritys lisääntyneelle jarrupolkimen liikematkalle esimerkiksi hydraulipiirin vuodon sattuessa.
- Jarrujärjestelmän tehokkuus: Määritys jarrujärjestelmän tehokkuuden muutoksille häiriön ilmetessä.
- Jarrutuksen stabiliteetti: Määritys jarrutustapahtuman stabiliteetin muutokselle häiriön ilmetessä.
- Jarrujärjestelmän suorituskyky: Määritys jarrujärjestelmän suorituskyvyn alenemiseen häiriön ilmetessä.

4 Jarrujärjestelmän koestus ja testaus

4.1 Testausprosessi

Jarrujärjestelmän testausprosessi (kuva 28) perustuu etukäteen luotuun testausprotokollaan, ja tällä tavalla eri testaukset pysyvät vertailukelpoisina. Jarrukomponenttien testausprosessi etenee yleisesti siten, että järjestelmän eri komponentit käyvät kolmi-vaiheisen testauksen. Staattisessa testauksessa tarkistetaan komponentin perustoiminta ja suoritetaan esimerkiksi jäykkyyksmittaus. Dynaamisessa testauksessa komponenttia kuormitetaan ja rasitetaan esimerkiksi jarrusimulaattorissa. Ajoneuvotestauksessa kaikki jarrujärjestelmän komponentit ovat ensimmäistä kertaa käytössä samanaikaisesti, ja siinä testataan järjestelmän toimivuutta kokonaisuutena. Lisäksi ajoneuvotestauksen aikana saatetaan kokeilla esimerkiksi erilaisia jarrupalatyyppejä. [15]



Kuva 28. Jarrujärjestelmän testausprosessi

4.2 Painopisteen sijainti

Jarrujärjestelmän toimivuuden kannalta auton painopisteen sijainnilla on merkittävä vaikutus. Jarrutustilanteessa dynaamisen painonsiirron johdosta painopisteen sijainti vaikuttaa akselivoimien siirtymiseen, joten jarrujärjestelmää suunniteltaessa olisi hyvä olla tiedossa hyvä arvio niin paino- ja akselien välillä kuin painopisteen sijainnista korkeussuunnassa. Painopisteen sijainti voidaan arvioida teoreettisesti CAD-

mallien avulla tai tilastollisten menetelmillä, mutta se voidaan myös määrittää kokeellisesti.

Auton painopisteen sijaintia mitattaessa voidaan auto kuormata halutulla tavalla, mutta yleisesti on tapana kuormata auto 2–4 ihmisellä, joiden pituus on keskimäärin 170 cm ja paino 68 kg [16, s. 387]. Näin varmistutaan siitä, että auto on kuormattu mittaustilanteessa dynaamista ajotilannetta vastaavaksi.

4.2.1 Painopisteen sijainti auton pituussuunnassa

Auton painopisteen pituus-suuntaisen sijainnin määrittämien aloitetaan auton akselipainojen mittaamisella (kuva 29). Autoa punnittaessa tulisi auton olla tasaisella alustalla siten, että jokaisen pyörän alla on vaaka. Mikäli tuloksesta halutaan mahdollisimman tarkka, tulisi eturenkaiden olla käännettävissä vapaasti mittauksen aikana. [16, s. 387.]



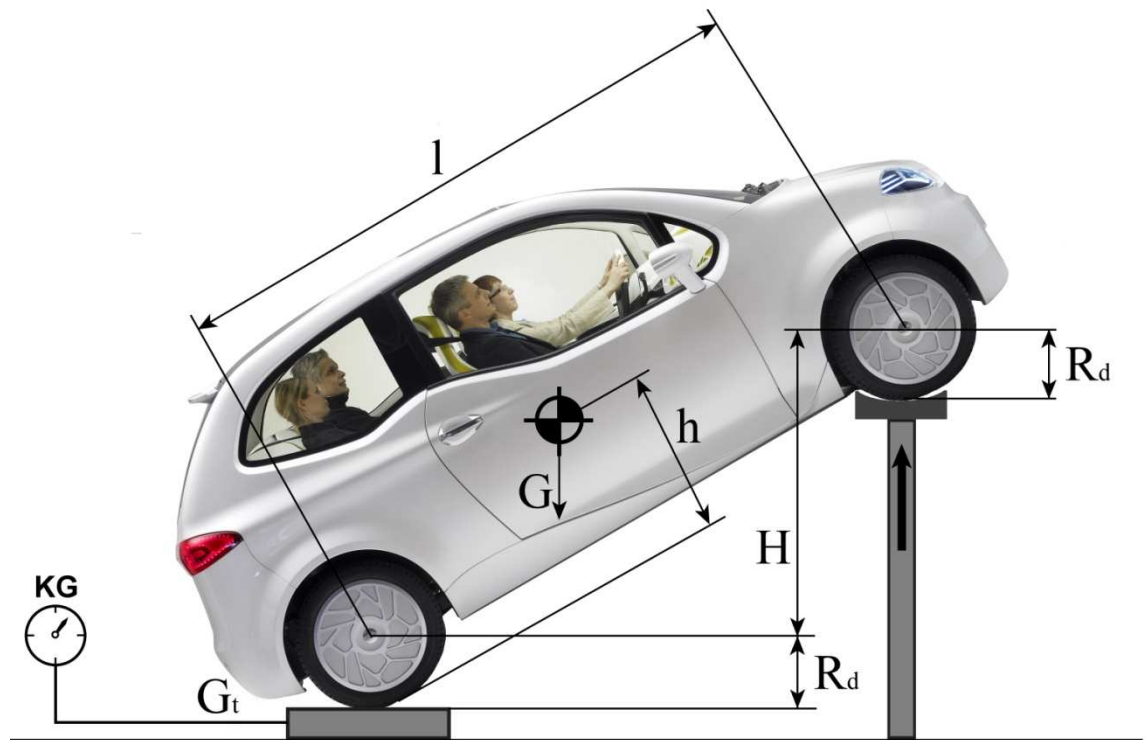
Kuva 29. Auton akselipainojen mittaaminen

4.2.2 Painopisteen sijainti auton korkeussuunnassa

Painopisteen korkeus voidaan määrittää esimerkiksi mittaamalla auton painonsiirtoa etuakselin nostokorkeuden funktiona (kuva 30). Ennen mittauksia on suoritettava auton taka-akselipainon mittaus, jolloin saadaan tietoon taka-akselin staattinen paino. Tämän jälkeen auton takarenkaiden alle asetetaan vaa'at ja auton etupäätä nostetaan asteittain. [16, s. 388.]

Ennen painopisteen korkeuden mittaamista on oltava kuitenkin selvillä seuraavista asioista [16, s. 388]:

- Mittaus pitää suorittaa turvallisesti siten, että ei pääse syntymään tapaturma-vaaraa. Käyttöjarrun ja seisontajarrun pitää olla vapautettuna ja vaihteen kytkettynä vapaalle. Eturenkaita pitää pystyä kääntämään vapaasti, jotta voidaan olla varmoja siitä, että mittaustulos ei ole vääristynyt.
- Eturenkaita pidetään nostoalustalla koko mittauksen ajan samassa pisteessä, ja ainoastaan takarenkaat liikkuvat nostoliikkeen johdosta.
- Etuakselia nostaessa pitää olla varma, että nostosuunta on suoraan ylöspäin.
- Auton on hyvä olla mittauksen aikana täydessä ajokunnossa: täysi tankki polttoainetta, työkalut, vararengas jne. Mittaus voidaan suorittaa myös kuormamalla auto eri tavoilla ja suorittamalla eri mittauksia.
- Kummankin akselin jousitus pitäisi saada lukittua paikalleen, ennen kuin auton nostaminen aloitetaan. Yleensä riittää kuitenkin, että ainoastaan takajousitus lukitaan. Jousituksen lukitsemistyökalun pitää olla säädettävä, jotta jousitus saadaan lukittua paikalleen eri kuormaustapauksissa.
- Rengaspaineet kannattaa nostaa kummallakin akselilla mittauksen ajaksi n. 3,0–3,5 bar:iin, jotta voidaan eliminoida renkaiden muodonmuutoksien vaikutus mittaustuloksiin.
- Mittaustarkkuus paranee mitä korkeammalle autoa nostetaan mittauksen aikana. Mittaus voidaan aloittaa esimerkiksi nostokorkeudesta 0,5 m ja nostaa siitä 0,2 m:n välein 1,0 metriin asti.



Kuva 30. Auton painopisteen korkeuden mittaaminen

Auton painopisteen korkeus voidaan laskea fysiikan lakien mukaisesti:

$$h = \left(\frac{l^2}{H} * \frac{G'_t - G_t}{G} * \sqrt{l - \frac{H^2}{l^2}} \right) + R_d$$

h = painopisteen korkeus maanpinnasta

l = akseliväli

H = auton nostokorkeus

G'_t = taka-akselin dynaaminen akselipaino

G_t = taka-akselin staattinen akselipaino

G = koko auton staattinen paino

R_d = renkaan dynaaminen säde

4.3 Jarrujärjestelmän suorituskyvyn mittaus

Suoritettaessa auton jarrujärjestelmälle mittauksia olisi hyvä suorittaa mittauksia eri tilanteissa.

- elektronisten apujärjestelmien kanssa ja ilman
- jarrutehostuksen kanssa ja ilman
- simuloimalla vikaa jarrujärjestelmässä esim. jarrupiirivuoto.

4.3.1 Jarrutusvoima

Auton pyöräkohtaiset jarrutusvoimat voidaan mitata siihen tarkoitetussa jarrudynamometrissä. Samassa mittauksessa nähdään myös, onko saman akselin pyöräjarruvoimissa eroa tai ilmeneekö jarrujärjestelmässä hystereesiä. Hystereesi ilmenee käytännössä vierintävastuksena, kun jarruvoima vapautetaan. Vierintävastusta voi myös syntyä, mikäli pyöräjarrut ovat jumissa ja niissä esiintyy kitkapintojen laahausta.

Suomessa katsastuksen arvosteluperusteet määrittelevät seuraavat edellytykset käyttöjarrulle jarrudynamometrissä mitattuna [17, s. 13]:

- Jarruvoimien ero saman akselin pyörillä ei saa ylittää 30 % suuremmasta jarruvoimasta.
- Jarruvoima ei saa vaihdella yli 30 % kun rengas on lukkiutumisrajalla.
- Jarruvoiman pitää muuttua tasaisesti suhteessa jarrupoljinvoimaan ja jarrupolkimen liikematkaan.
- Jarrujärjestelmässä ei saa ilmetä epänormaaleja viiveitä.

- Mikäli etupyörät eivät lukkiudu suurimmalla sallitulla jarrupoljinvoimalla (henkilöautot 500 N), on määriteltävä kokonaisjarruvoiman suuruus, joka on 30 % ajoneuvon kokonaismassasta.

Seisontajarrulle katsastuksen arvosteluperusteet määrittelevät seuraavat edellytykset jarrudynamometrissä mitattuna:

- Suurin sallittu käyttövoima käsikäyttöisissä on 400 N ja jalkakäyttöisissä 500 N.
- Kokonaisjarruvoiman oltava vähintään 16 % auton kokonaismassasta, elleivät pyörät lukkiudu.
- Jarruvoimien ero saman akselin pyörillä saa olla enintään 70 % suurimmasta jarruvoimasta.

4.3.2 Jarrutusmatka

Jarrutusmatkaa voidaan mitata ajamalla tiettyä nopeutta ja suorittamalla mahdollisimman tehokas jarrutus siten, että auto on mittauksen lopussa täysin pysähtynyt. Fysiikan lait määrittelevät, että jarrutusmatka on verrannollinen alkunopeuden neliöön: mikäli alkunopeus kaksinkertaistuu, jarrutusmatka nelinkertaistuu. Toisaalta jos taas tarkastellaan tietystä alkunopeudesta suoritettavia jarrutuksia erilaisilla keleillä, on jarrutusmatka kääntäen verrannollinen hidastuvuuteen. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että hidastuvuuden kaksinkertaistuessa jarrutusmatka pienenee puoleen.

Jarrutusmatkaa voidaan mitata jarruttamalla eri nopeuksista, erilaisissa keliolosuhteissa ja erityyppisillä renkailla sekä kuormaamalla auto esim. kevyesti ja täysin.

4.4 Jarrutuksen stabiliteetti

Jarrutuksen stabiliteettia voidaan mitata lukuisilla erityyppisillä jarrutustesteillä auto kevyesti ja täysin kuormattuna:

- jarrutus liukkaalla pinnalla

- saman akselin pyörät eri kitkapinnalla
- jarrutettaessa mutkaan.

4.5 Jarrutustuntuma

Jarrutustuntumaa voidaan arvioida, kun tiedetään tietyllä jarrupoljinvoimalla saavutettu auton hidastuvuus. Lisäksi voidaan mitata jarrupolkimen liikematkaa. Mikäli halutaan mitata jarrutustuntumaa, voidaan se suorittaa esimerkiksi mittaamalla seuraavia parametreja:

- jarrupoljinvoima ja sen lineaarisuus suhteessa auton hidastuvuuteen
- auton hidastuvuus
- auton nopeus
- jarrupolkimen liikematka.

5 Jarrujärjestelmän mitoitus esimerkki

5.1 Reverse engineering

Termi *reverse engineering* on englannin kieltä ja sille on vaikea määrittää suomenkielistä nimitystä. Reverse engineering voi tarkoittaa monia asioita, mutta tässä mitoitusmerkissä sitä käytetään menetelmänä tutkiessa jo olemassa olevaa jarrujärjestelmää, sen komponentteja, komponenttien tehollisia dimensioita sekä komponenttien toimintaa järjestelmänä. Samalla voidaan suorittaa myös teoreettisten tulosten verifiointia, kun suoritetaan käytännön mittauksia ja verrataan käytännön mittausten tuloksia teoreettisiin tuloksiin.

5.2 Esimerkkiautolle asetettavat ominaisuudet ja vaatimukset

Autoteollisuudessa on tyypillistä, että auton jarrujärjestelmä suunnitellaan siten, että jarrukomponentit voidaan ostaa suoraan ulkopuoliselta valmistajalta, ja näin jarrukomponentteja ei tarvitse itse suunnitella. Näin menetellään myös tämän insinööritoimitusesimerkissä. Esimerkissä käydään läpi auton jarrukomponenttien mitoittaminen, jarrukomponenttien valinta sekä tarkastellaan auton jarrujärjestelmän teoreettista suorituskykyä.

Mitoitusesimerkin auto on suunniteltu täyttämään vähintään EU:n lakivaatimukset M1-ajoneuvoluokassa. Taulukossa 7 esitetään autolle asetettuja ominaisuuksia ja vaatimuksia, joiden pohjalta jarrujärjestelmää on saatettu lähteä suunnittelemaan.

Taulukko 7. Mitoitusesimerkin autolle asetetut ominaisuudet ja vaatimukset jarrujärjestelmän suhteen

Auton paino kevyesti ja täysin kuormattuna	1740 kg (kevyesti kuormattuna) ja 2060 kg (täysin kuormattuna)
Staattinen painojako kevyesti ja täysin kuormattuna	60/40 % (etu/taka) kevyesti kuormattuna ja 55/45 % (etu/taka) täysin kuormattuna
Akseliväli	2675 mm
Painopisteen korkeus kevyesti ja täysin kuormattuna	690 mm kevyesti kuormattuna ja 690 mm täysin kuormattuna
Auton käyttötarkoitus	B-segmentti
Renkaan ja vanteen koko	Alumiinivanteet 17", renkaat 225/45 R17
Suunniteltu maksiminopeus	225 km/h
Sähköavusteiset järjestelmät	Jarrutehostin alipainepumpulla, hätäjarrutuksen tehostus, lukkiutumattomat jarrut ja ajonvakautusjärjestelmä
Lakivaatimukset	Euroopan unionin lakivaatimukset

5.3 Komponenttien mitoitusprosessi

Komponenttien mitoitusprosessin alussa on oltava tiedossa taulukon 7 mukaiset tiedot autolle asetetuista vaatimuksista ja suunnitelluista ominaisuuksista. Mikäli lähtötiedot muuttuvat mitoitusprosessin edetessä, on oltava selvillä muutosten vaikutuksesta jarrujärjestelmän suorituskykyyn ja turvallisuuteen sekä mahdollisuuksien mukaan tehtävä muutoksia jarrujärjestelmän komponenttivalintoihin.

Mitoitusprosessi aloitetaan valitsemalla jarrupoljinvoima, jolla auto saavuttaa maksimihidastuvuuden. Tässä mitoitusmerkissä päätetään, että maksimissaan 300 N:n jarrupoljinvoimalla auton pitää saavuttaa maksimihidastuvuus kaikissa jarrutustilanteissa.

5.4 Mitoitusmerkinnän autossa käytettävät jarrukomponentit

Autossa käytetään saksalaisen TRW:n ja ATE:n jarrukomponentteja. Molemmat yritykset ovat valmistajana tunnettuja ja tarjoavat paljon tietoa jarrukomponenteistaan.

5.4.1 Jarrupoljin

Jarrupolkimen dimensioilla voidaan määritellä millainen välityssuhde polkimelle halutaan (kuva 31). Välityssuhteen ansiosta kuljettajan poljinpintaan aiheuttama voima kertaantuu jarrutehostimelle. Jarrupolkimen teholliset dimensiot mitattiin ja välityssuhteeksi saatiin 1:3,8 eli esimerkiksi kun kuljettaja painaa poljinpintaa 300 N:n voimalla, välittyy jarrutehostimelle 1140 N:n voima [18].

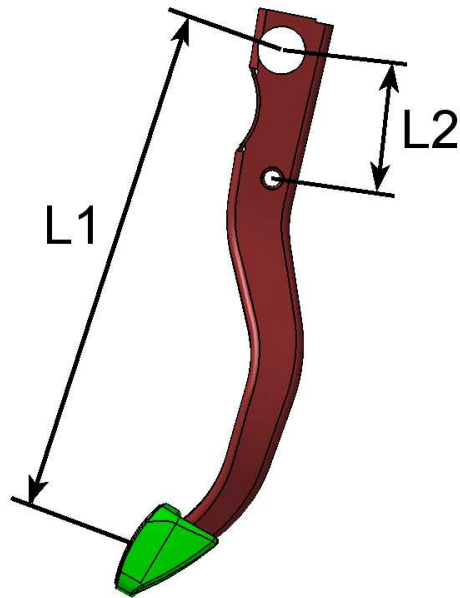
Välityssuhde voidaan laskea kaavalla

$$l_p = \frac{l_1}{l_2}$$

l_p = polkimen välityssuhde

l_1 = polkimen pituus (laakerointipisteestä poljinpinnan keskikohtaan)

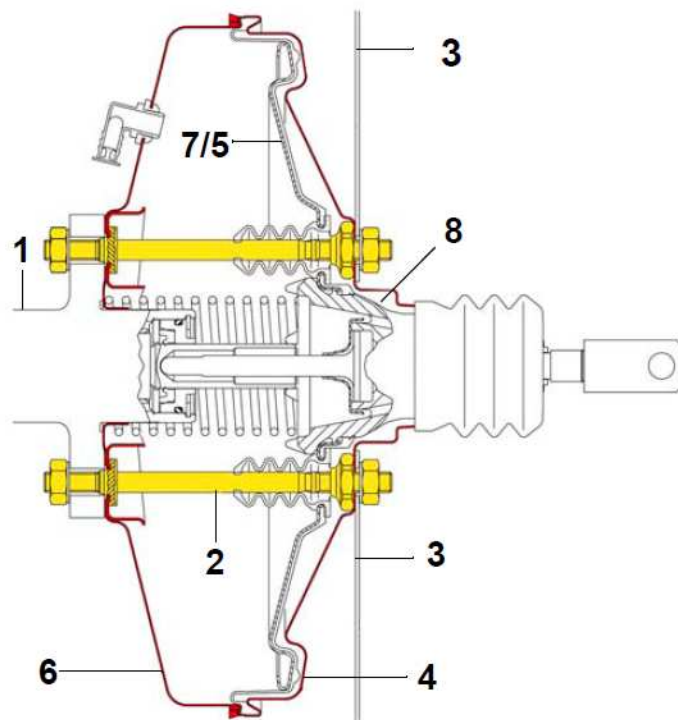
l_2 = polkimen pituus (laakerointipisteestä jarrutehostimen kiinnityskohtaan)



Kuva 31. Jarrupolkimen mitat, jotta voidaan laskea välityssuhde

5.4.2 Tehostinyksikkö

Jarrutehostimen (kuva 32) ansiosta kuljettajan tuottama poljinvoima kertaantuu tehostimessa ja näin ollen auton nopeuden hidastamiseen vaadittava poljinvoima pienempi kuin vanhemmissa autoissa, joissa tehostusta ei ollut. Jarrutehostin muodostuu kahdesta toisistaan erotetusta ilmasäiliöstä, joista toisessa vallitsee ilmakehän paine ja toisessa alipaine, joka tuotetaan joko moottorin imusarjan avulla tai erillisellä alipainepumpulla. Mitä suurempi jarrutehostin on ulkohalkaisijaltaan ja sitä myöten pinta-alaltaan, sitä suurempi on myös tehostuksen vaikutus.



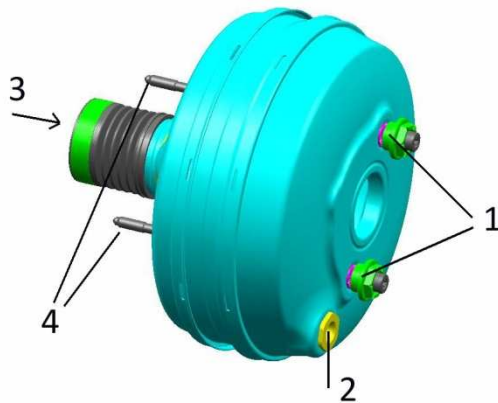
Kuva 32. Jarrutehostimen leikkauskuva: 1. Jarrupääsylinteri, 2. Kiinnityspultti, 3. Auton rintapelti, 4. Suojakuori, 5. Välikalvon levy, 6. Suojakuoren pohja, 7. Välikalvo, 8. Venttiilin runko [2]

Esimerkkiautossa käytettävä jarrutehostin on malliltaan TRW LSC130T HEDR-F (kuva 33).

- TRW = valmistaja
- L = erittäin kevyt (lightweight)
- S = metallikuori (steel shell)
- C = kompakti (compact)
- 130T = 9" + 9" halkaisijat
- HE = tehoventtiili (high efficiency valve)

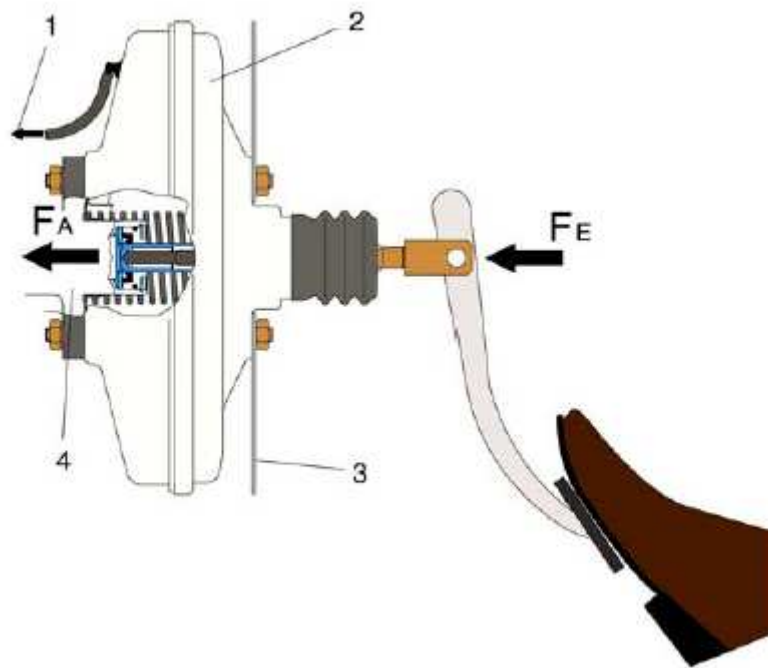
- DR = muuttuva tehostus-suhde (dual rate)
- F = kiinnitys etupäästä (front boltet)

Automallista riippuen alipaine voidaan ottaa imusarjasta tai alipaine voidaan tuottaa erillisellä alipainepumpulla. Olemassa on myös näiden kahden risteytyksiä. Tällainen toteutus löytyy myös esimerkkiautosta. Jarrutehostin löytyy sijoitettuna jarrupolkimen ja pääsylinteri väliin.



Kuva 33. Jarrutehostin: 1. Pääsylinterin kiinnitys, 2. Alipaineliitäntä, 3. Voima jarrupolkimelta, 4. jarrutehostimen kiinnityspisteet

Yleisesti voidaan todeta, että mitä suurempi jarrutehostin on fyysiseltä kooltaan, sitä suurempi on myös tehostussuhde. Valmistajalta saamani tiedon mukaan kyseisessä autossa oleva jarrutehostin saa aikaan 550 N:n polkimelta välittyvän voiman tehostumisen noin 3000:iin [18]. Tästä voidaan helposti laskea tehostussuhde.



Kuva 34. Jarrutehostimen toimintaperiaate: 1. Alipaineliitäntä, 2. Jarrutehostin, 3. Auton rinta-pelti, 4. Jarrupääsylinteri [2, s. 18]

$$i = \frac{F_A}{F_E}$$

i = tehostussuhde

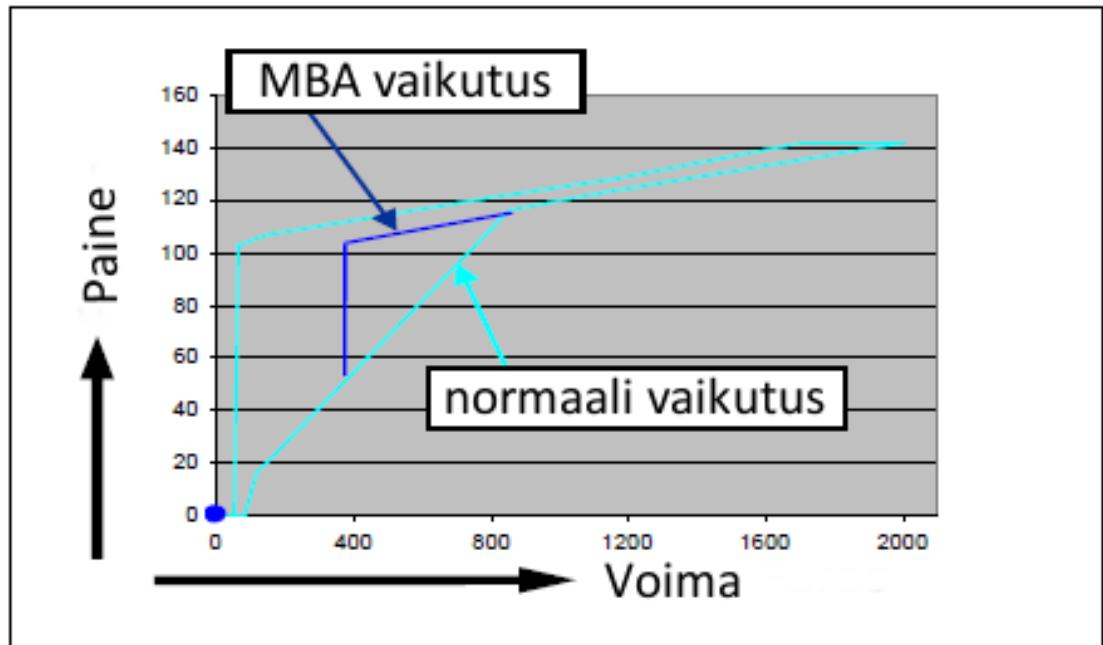
F_A = ulos välittyvä voima jarrutehostimelta [N]

F_E = sisään välitetty voima jarrutehostimelle [N]

$$i = \frac{3000 \text{ N}}{550 \text{ N}} \approx 5,5$$

Jarrutehostimeen on myös integroitu MBA (Mechanical Brake Assist) -toiminto (kuva 35), joka antaa voimakkaamman alipaineavun. Tämä toiminto on kehitetty hätäjarrutustilanteita varten, jolloin tutkimusten mukaan ihmiset painavat usein jarrupoljinta liian pienellä voimalla ja maksimaalista jarruvoimaa ei saavuteta. Käytännössä tämä on toteutettu siten, että ilmasäiliöiden välillä olevan reaktiolevyn pinta-alaa muutetaan tilanteesta riippuen. MBA on suunniteltu siten, että kun järjestelmä tunnistaa riittävän

nopean ja voimakkaan jarrupolkimen painamisen, lisää järjestelmä tehostus-suhdetta 1:5,5 -> 1:8,4,0, kunnes poljinvoima tai ajoneuvon nopeus pienenee riittävästi. Tällöin myös hätäjarrutustilanteessa myös pienellä poljinvoimalla saavutetaan maksimijarruvoima ja samalla jarrutusmatka lyhenee. [18; 19.]



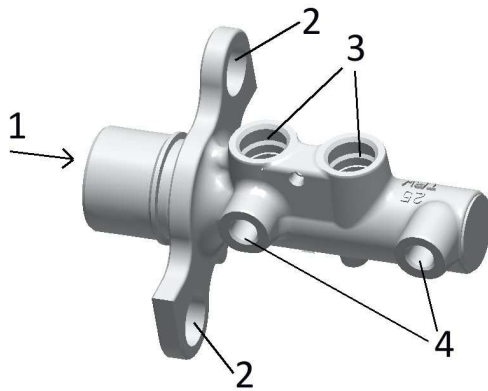
Kuva 35. Kaavio MBA:n toiminnan vaikutuksesta [19]

Vaikka jarrutehostin toimiikin turvallisuutta lisäävänä jarrukomponenttina pienentämällä vaadittua jarrupoljinvoimaa, on kuljettajan pystyttävä hidastamaan auton nopeus lain vaatimusten mukaisesti, vaikka jarrutehostusta ei olisikaan mahdollisen vian sattuessa.

5.4.3 Jarrupääsylinteri

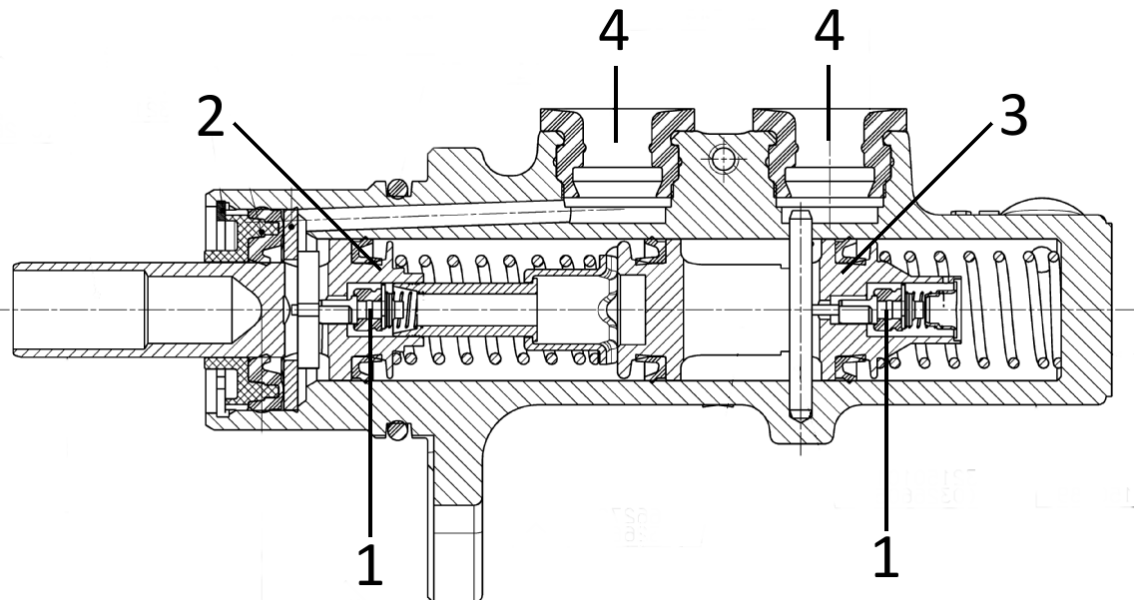
Esimerkkiautossa käytetty TRW:n valmistama PML430 -jarrupääsylinteri on tandem-tyyppinen pääsylinteri (kuva 36). Se sisältää yhden pitkän sylinterin, jossa on kaksi peräkkäistä mäntää kummallekin jarrupiirille (kuvat 37 ja 38). Kun ensimmäiseen mäntään kohdistetaan voima, saa mäntien välissä oleva paine myös jälkimmäisen männän liikkumaan ja tuottamaan paineen toiseen hydraulipiiriin. Lepotilassa hydraulipiiri on avoin, ja siellä ei ole painetta, mutta kun männässä oleva tiiviste ohittaa jarrunestesäiliön sisääntuloliitännän, muuttuu piiri suljetuksi ja hydraulipaine alkaa muodostua. Pää-

sylinterin halkaisija on 25,4 mm. Jarrutehostinyksikkö, jarrupääsylinteri ja nestesäiliö (tyhjänä) painavat yhteensä 4,35 kg.



Kuva 36. Jarrupääsylinteri: 1. Voima jarrutehostimelta, 2. Kiinnityspisteet jarrutehostimeen, 3. Liitäntä jarrunestesäiliölle, 4. Ulostuloportit jarruputkille

TRW PML430 -pääsylinteri on erityisesti tarkoitettu autoihin, joissa on ajovakaudenhallintajärjestelmä. Sen vuoksi pääsylinteriin on sisäänrakennetut TC-venttiilit kummallekin männälle. TC-venttiilien ansiosta pääsylinteri kestää nyt luistonesto- ja ajonvakaudenhallintajärjestelmien aiheuttamat painepulssit hydraulijärjestelmässä.

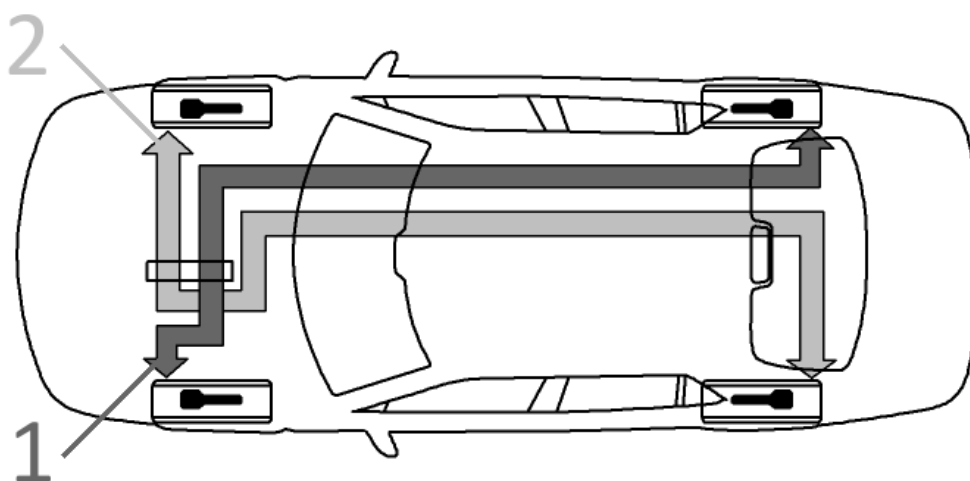


Kuva 37. Leikkauskuva jarrupääsylinteristä: 1. TC-venttiili, 2. Ensiopiirin mäntä, 3. Toisiopiirin mäntä, 4. Liitäntä jarrunestesäiliölle [18]

5.4.4 Jarrupiirijako

Jarrupiiri on jaettu ensiö- ja toisiopiiriin (kuva 38). Ensiöpiiri kuuluu vasemman etupyörän ja oikean takapyörän jarruun, toisiopiiri oikean etupyörän ja vasemman takapyörän jarruun. Tämä jarrupiirijako vaatii käytännössä sen, että kummassakin jarrupiirissä vallitsee sama hydraulipaine. Jarrusatuloissa painuvat männät ulos ja puristavat jarrupalat jarrulevyjä vasten. Jos toinen piiri putoaa pois esim. vuodon takia, toisen jarrupiirin jarruvaikutus säilyy. Lisäksi koska piirit ovat kytketty ristiin, mahdollisen vuodon sattuessa auton stabiliteetti säilyy.

Toinen yleisesti käytetty jarrupiirijako on etu- ja takapiiri, jolloin vuodon sattuessa takapiirillä pystytään autolla jarruttamaan tehokkaasti vielä etujarruilla. Toisaalta mikäli vuoto on etupiirillä, on takapiirillä jarruttaminen verrattavissa käsijarrun käyttöön, mikä tarkoittaa varsinkin liukkaalla kelillä epästabiilia jarrutusta.

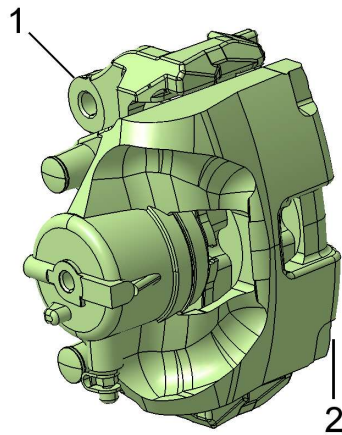


Kuva 38. Jarrupiirijako 1. ensiöpiiri (vas. etupyörä ja oik. takapyörä) ja 2. toisiopiiri (oik. etupyörä ja vas. takapyörä) [18]

5.4.5 Etujarrusatula

Autossa käytettävät jarrusatulat ovat ATE:n valmistamia. Etujarrusatula (kuva 39) on valmistettu alumiinin ja valuraudan yhdistelmästä. Se on tyypiltään kelluva ja sisältää yhden männän halkaisijaltaan 57 mm. Kelluvalla jarrusatulalla tarkoitetaan tässä tapauksessa ns. liikutappiohjattua jarrusatulaa. Jarrusatula jakautuu siten kahteen eri

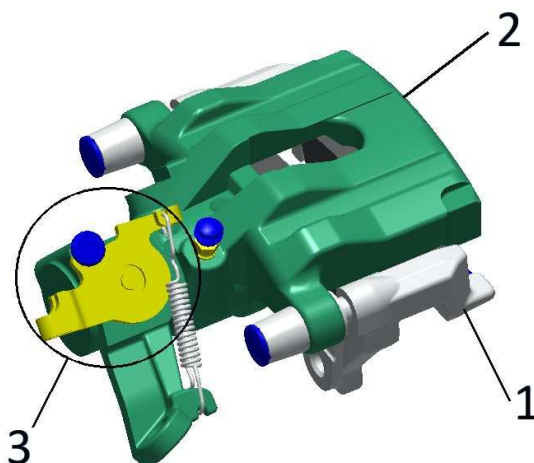
osaan: runkoon ja satulaan. Näistä satula liukuu rungossa kahden liikutapin avulla. Etujarrusatula painaa 7,7 kg, joka sisältää rungon pultit ja jarrupalat.



Kuva 39. Etujarrusatula: 1. Runko, 2. Jarrusatula

5.4.6 Takajarrusatula

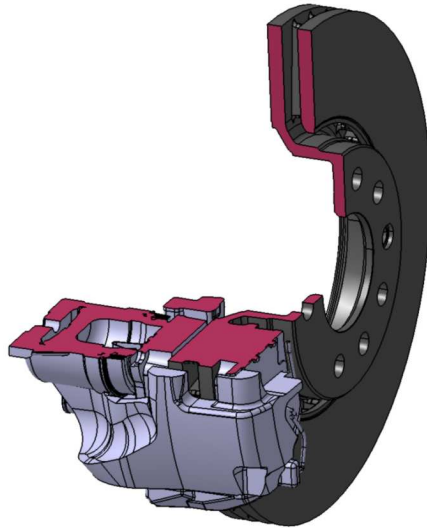
Takajarrusatula (kuva 40) on myös ATE:n valmistama. Se on valmistettu alumiinista ja on tyypiltään etujarrusatulan tavoin kelluva. Männän halkaisija on 38 mm ja lisäksi siihen on integroitu mekanismi seisontajarrulle ja itsesäädölle. Takajarrusatula painaa 3,4 kg, joka sisältää jarruletkun, rungon kiinnityspultit ja jarrupalat.



Kuva 40. Takajarrusatula: 1. Runko, 2. Jarrusatula, 3. Seisontajarrun mekanismi

5.4.7 Etujarrulevy

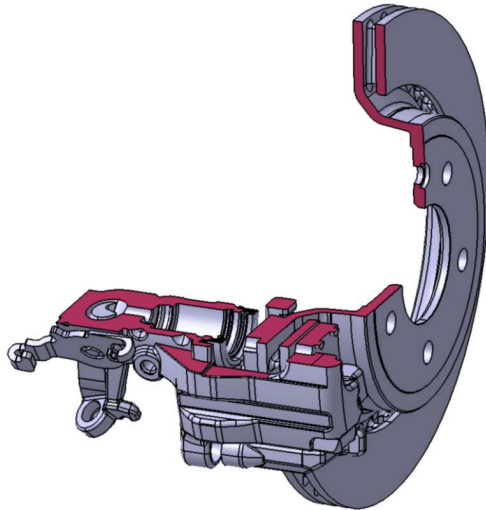
Etuakselilla käytetään teräksestä valmistettua jarrulevyä. Jarrulevyn kitkapinnan ulkohalkaisija on 302 mm ja sisähalkaisija 182 mm. Etujarrulevy on rakenteeltaan jäähdytetty ja kitkapinnan paksuus on 28 mm. Etujarrulevy painaa 9,3 kg. Kuvassa 41 nähdään läpileikkaus etujarrulevystä ja jarrusatulasta.



Kuva 41. Etujarrulevy: Ulkohalkaisija 302mm

5.4.8 Takajarrulevy

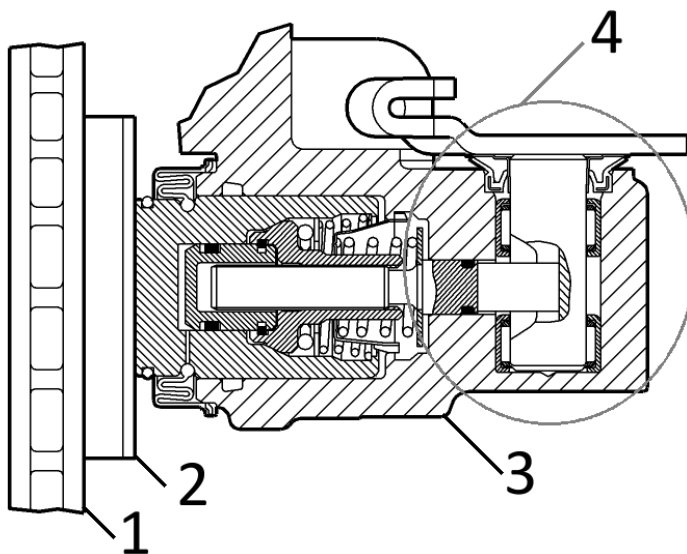
Taka-akselilla käytetään myös teräksestä valmistettua jarrulevyä. Takajarrulevyn kitkapinnan ulkohalkaisija on 292 mm ja sisähalkaisija 200 mm. Takajarrulevy on rakenteeltaan etujarrulevyn tavoin jäähdytetty, mutta kitkapinnan paksuus on 20 mm. Takajarrulevy painaa 5,4 kg. Kuvassa 42 nähdään läpileikkaus takajarrulevystä ja jarrusatulasta.



Kuva 42. Takajarrulevy: Ulkohalkaisija 292mm

5.4.9 Seisontajarru

Seisontajarru toimii perinteisessä autossa mekaanisesti perinteistä kahvaa nostamalla. ja näin on menetelty myös kyseisessä autossa. Kuvassa 43 nähdään läpileikkaus seisontajarrun mekanismin rakenteesta taka-akselin pyöräjarrussa. Tässä rakenteessa seisontajarrun mekanismi on integroitu takajarrusatulaan.



Kuva 43. Läpileikkaus takajarrusatulasta ja seisontajarrumekanismista: 1. Jarrulevy, 2. Jarrupala, 3. Jarrusatula, 4. Käsijarrun mekanismi [18]

5.5 Yhteenveto jarrukomponenttien dimensioista

Taulukossa 8 on lista mitoituksen esimerkkiautossa käytettävistä jarrukomponenteista.

Taulukko 8. Esimerkkiautossa käytettävät komponenttien dimensiot ja lukumäärät

Jarrupolkimen välityssuhde	3,8
Jarrupääsylinterin halkaisija	25,4 mm
Jarrutehostimen tehostusvaikutus	5,5–8,4
Etujarrusatulan männän halkaisija	57 mm
Takajarrusatulan männän halkaisija	38 mm
Etujarrusatulan mäntien lukumäärä	1
Takajarrusatulan mäntien lukumäärä	1
Etujarrulevyn tehollinen säde	110 mm
Takajarrulevyn tehollinen säde	110 mm
Etujarrulevyn paksuus	28 mm
Takajarrulevyn paksuus	20 mm
Etujarrupalan pinta-ala	57,5 cm ²
Takajarrupalan pinta-ala	32 cm ²
Etujarrupalan kitkapinnan paksuus	14 mm
Takajarrupalan kitkapinnan paksuus	11 mm

5.6 Käyttöjarrun teoreettinen suorituskyky

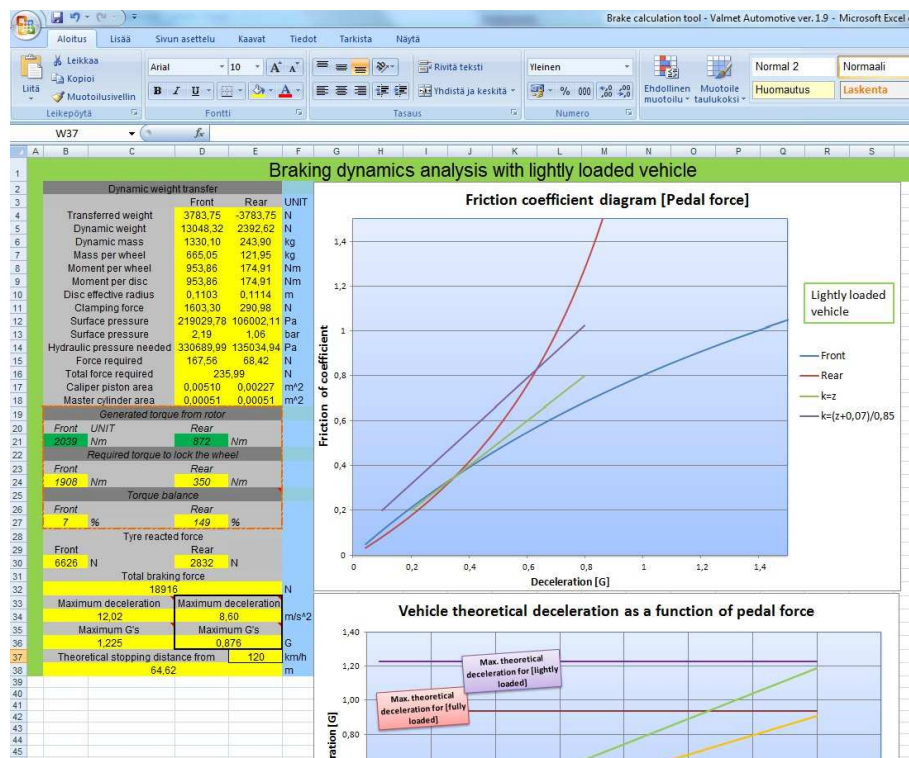
Käyttöjarrun teoreettista suorituskykyä ja ominaisuuksia voidaan arvioida kun tiedetään jarrujärjestelmässä käytettyjen komponenttien teholliset mitat ja auton ominaisuudet.

Jarrukomponenttien teoreettista sopivuutta ja suorituskyvyn arvioimista varten käytin jo Metropolia Motorsport -formulatiimissä kehittämäni laskuria, joka pohjautuu Microsoft Excel -laskentaohjelmaan (kuva 44). Laskurin avulla on helppo tutkia muutoksien vaikutuksia jarrujärjestelmän toimivuuteen ja suorituskykyyn. Kaikki Excel-tilaukkolaskentaohjelmassa syntyneet tulokset perustuvat seuraaviin fysiikan lakeihin:

- Newtonin I, II ja III laki
- liikemäärän säilymislaki

- kineettinen kaasuteoria
- energian säilymisen laki
- Steinerin sääntö.

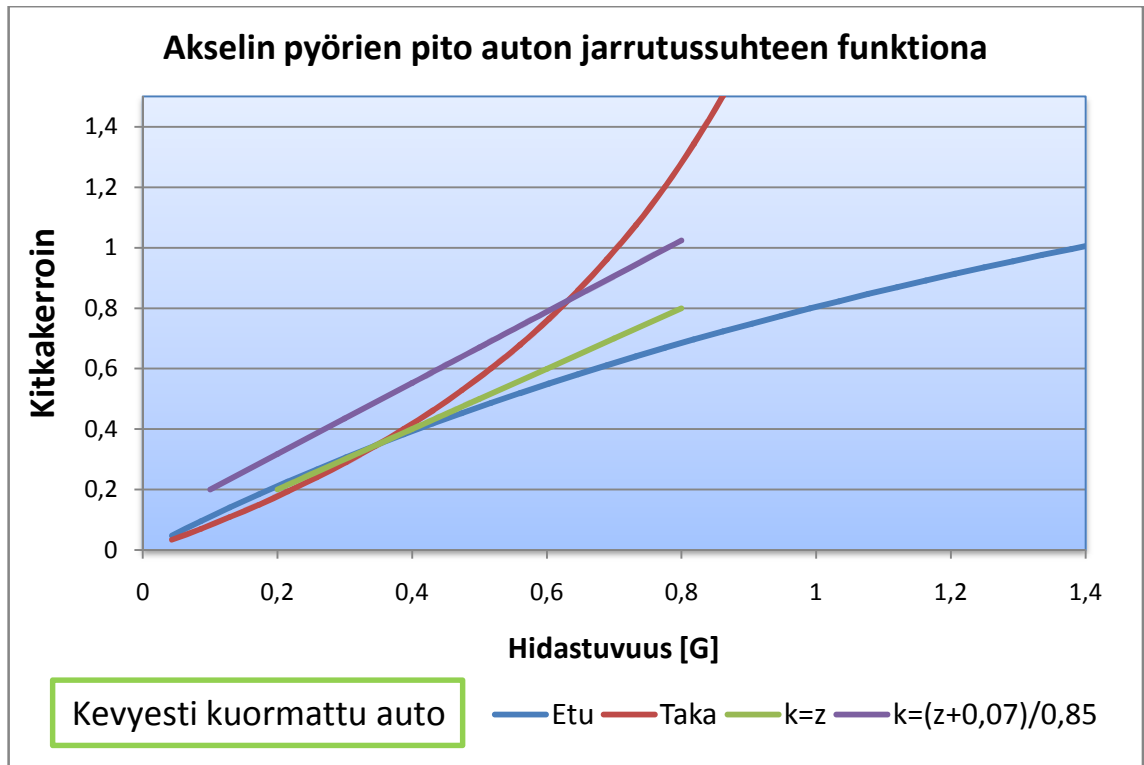
Laskuri suunniteltiin siten jo alun perin siten, että sitä voi käyttää minkä tahansa henkilöauton jarrujärjestelmän teoreettiseen analysointiin. Liitteestä 1 voidaan nähdä laskurilla tulostettu kooste jarrujärjestelmästä.



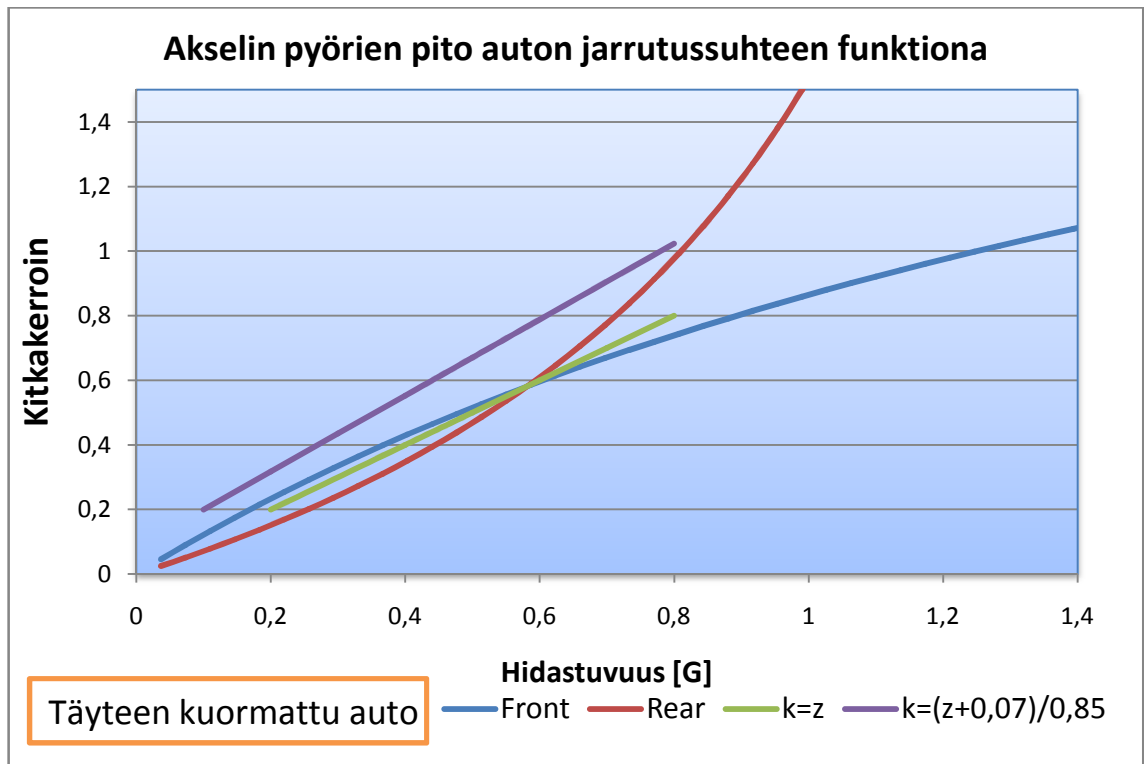
Kuva 44. Kuvankaappaus laskurin yhdestä välilehdestä

5.6.1 Jarrudirektiivin 98/12/EY mukainen kitkakäyrä

Kitkakäyrillä tarkoitetaan kummankin akselin käyriä, jotka esittävät akselin pyörien pidon ajoneuvon eri kuormitustiloissa ajoneuvon jarrutussuhteen funktiona. Kuvista 45 ja 46 nähdään, että ilman takajarruvoiman säätöä mitoitusesimerkkiauton jarrujärjestelmä ei täytä Euroopan yhteisöjen lakivaatimuksia, koska muutoin taka-akseli lukkiutuu ennen etuakselia kevyesti kuormatussa autossa jo n. 0,4 G:n hidastuvuudessa ja täyteen kuormatussa autossa n. 0,6 G:n hidastuvuudessa.



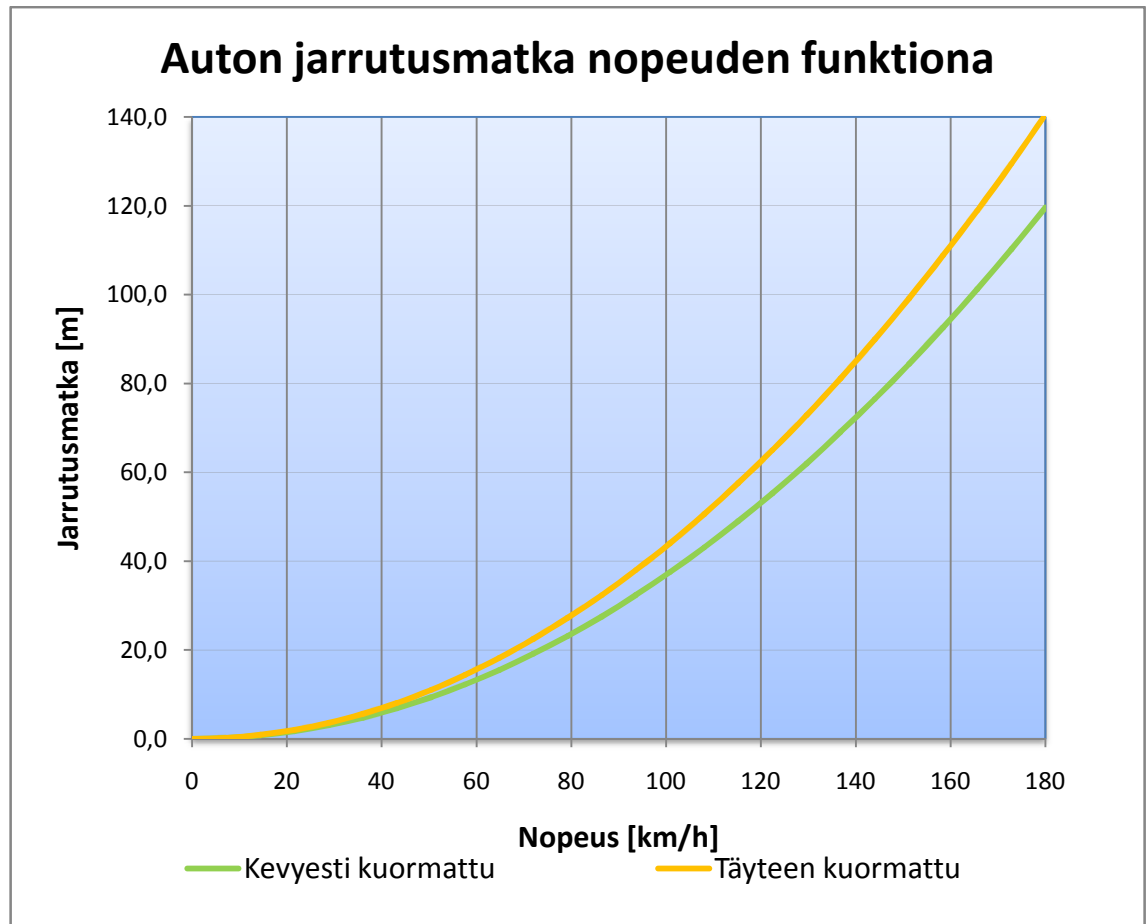
Kuva 45. Euroopan yhteisöjen direktiivin 98/12/EY:n mukainen kitkakäyrä kevyesti kuormatulle mitoitusesimerkin autolle



Kuva 46. Euroopan yhteisöjen direktiivin 98/12/EY:n mukainen kitkakäyrä täyteen kuormatulle mitoitusesimerkin autolle

5.6.2 Jarrutusmatka

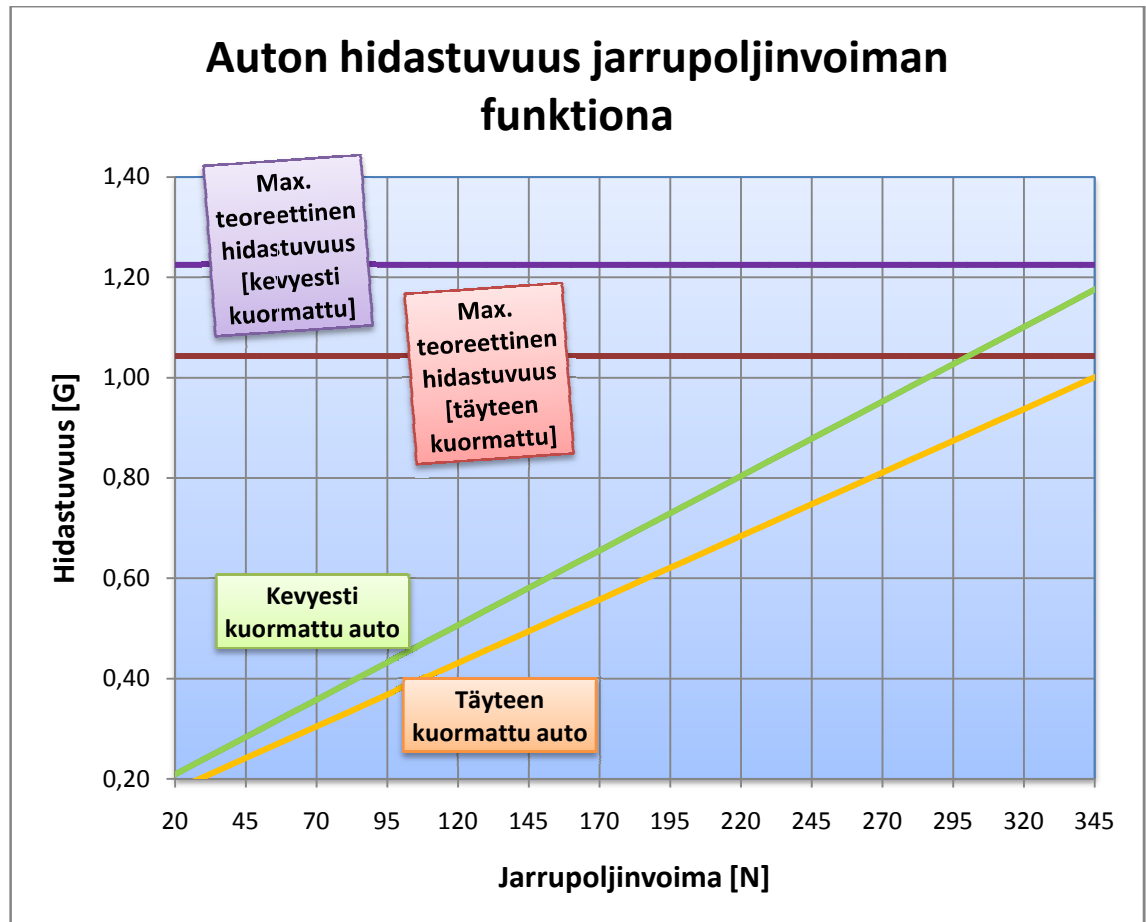
Myös mitoitusesimerkkiauton jarrutusmatkaa voidaan arvioida teoreettisesti. Kuvasta 47 nähdään, että kun suoritetaan jarrutus ajonopeudesta 100 km/h, on jarrutusmatkassa eroa n. 6 metriä kevyesti ja täysin kuormatun auton välillä.



Kuva 47. Mitoitusesimerkkiauton teoreettinen jarrutusmatka ajonopeuden funktiona

5.6.3 Auton hidastuvuus jarrupoljinvoiman funktiona

Jarrutustuntumaa kuvaava auton hidastuvuus jarrupoljinvoiman funktiona voidaan myös laskea teoreettisesti. Kuvasta 48 nähdään, että kevyesti kuormatulla mitoitusesimerkin autolla 0,8 G:n hidastuvuus saavutetaan n. 220 N:n voimalla, kun täyteen kuormattu auto vaatii n. 270 N:n voiman.

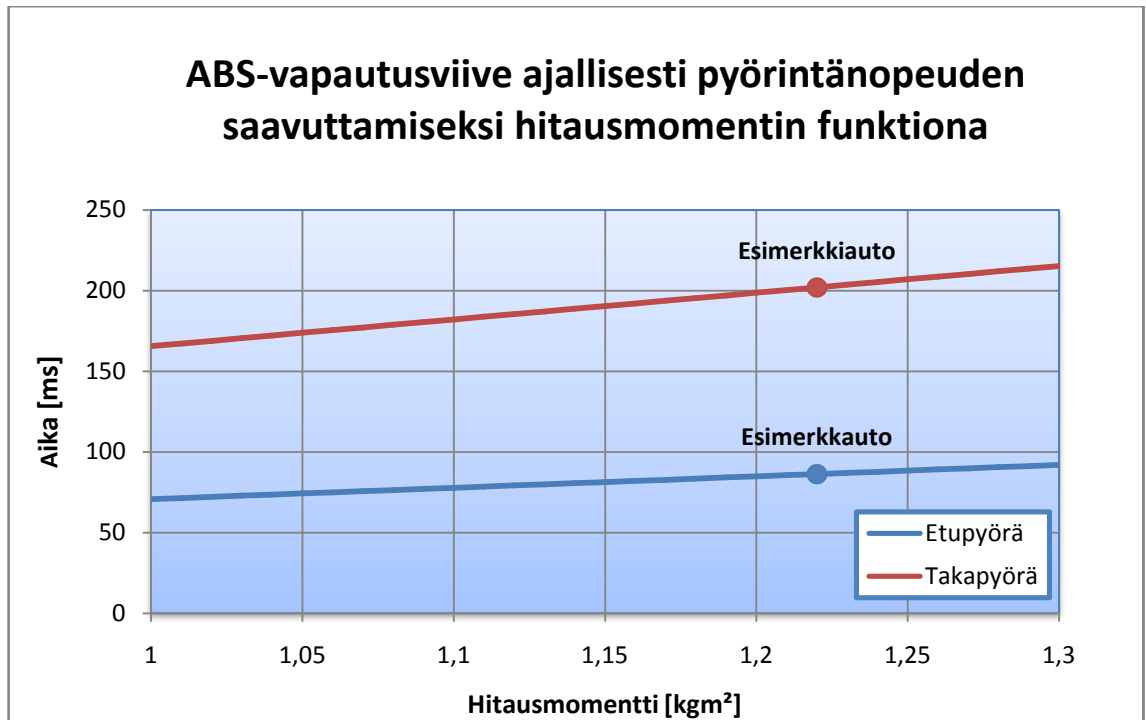


Kuva 48. Mitoitusesimerkkiauton teoreettinen hidastuvuus jarrupoljinvoiman funktiona

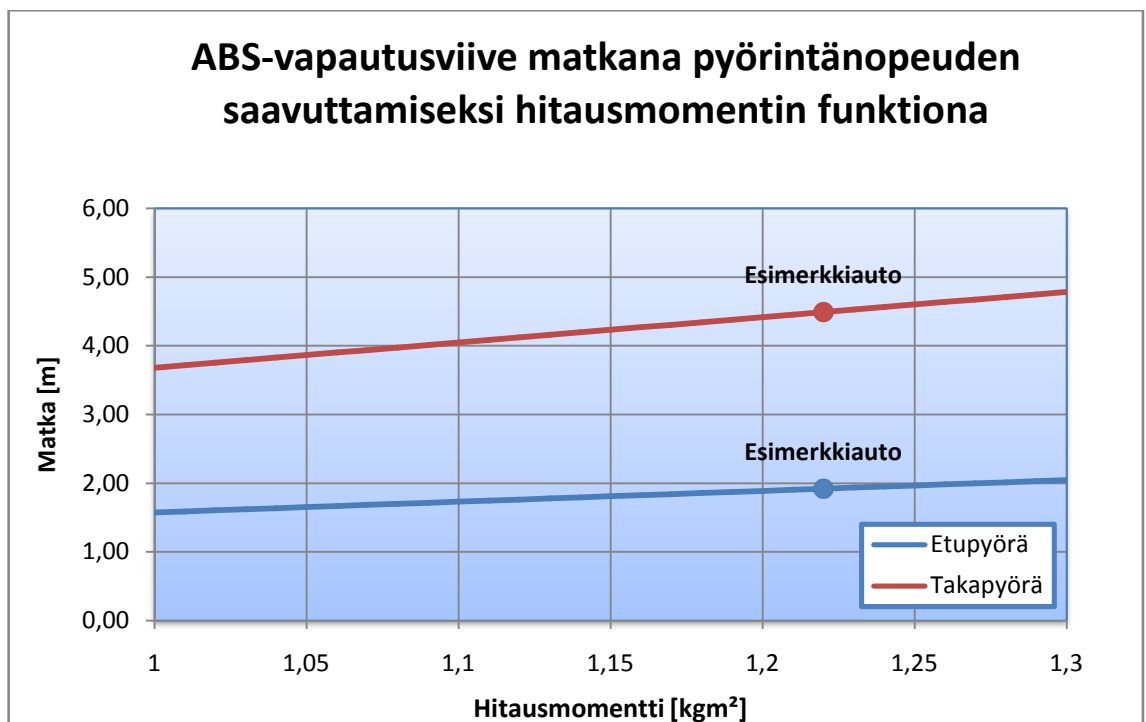
5.6.4 Pyörivien osien massahitausmomentin vaikutus ABS-säätöön

Kun tiedetään auton nopeus, voidaan arvioida pyörivien osien massahitausmomentin vaikutusta ABS-säätöön. Kuvissa 49 ja 50 on esitelty kaavio massahitausmomentin vaikutuksesta siihen, miten kauan menee ajallisesti ja matkallisesti, että rengas saavuttaa auton kulkunopeutta vastaavan pyörintänopeuden lukkiutumistilanteen jälkeen.

Kuvissa 49 ja 50 mitoitusesimerkissä käytetyn auton nopeus on 80 km/h. Kuvasta 49 nähdään, että etuakselin renkaalla kuluu n. 200 ms, että rengas saavuttaa auton nopeutta vastaavan pyörintänopeuden ja taka-akselin renkaalla n. 80 ms. Kuvasta 50 nähdään, että matkaa kuluu etuakselin renkaalle n. 4,5 metriä ja taka-akselin renkaalla n. 2 metriä. Tuloksien ero syntyy erisuuruisista massahitausmomenteista etu- ja taka-akselin välillä.



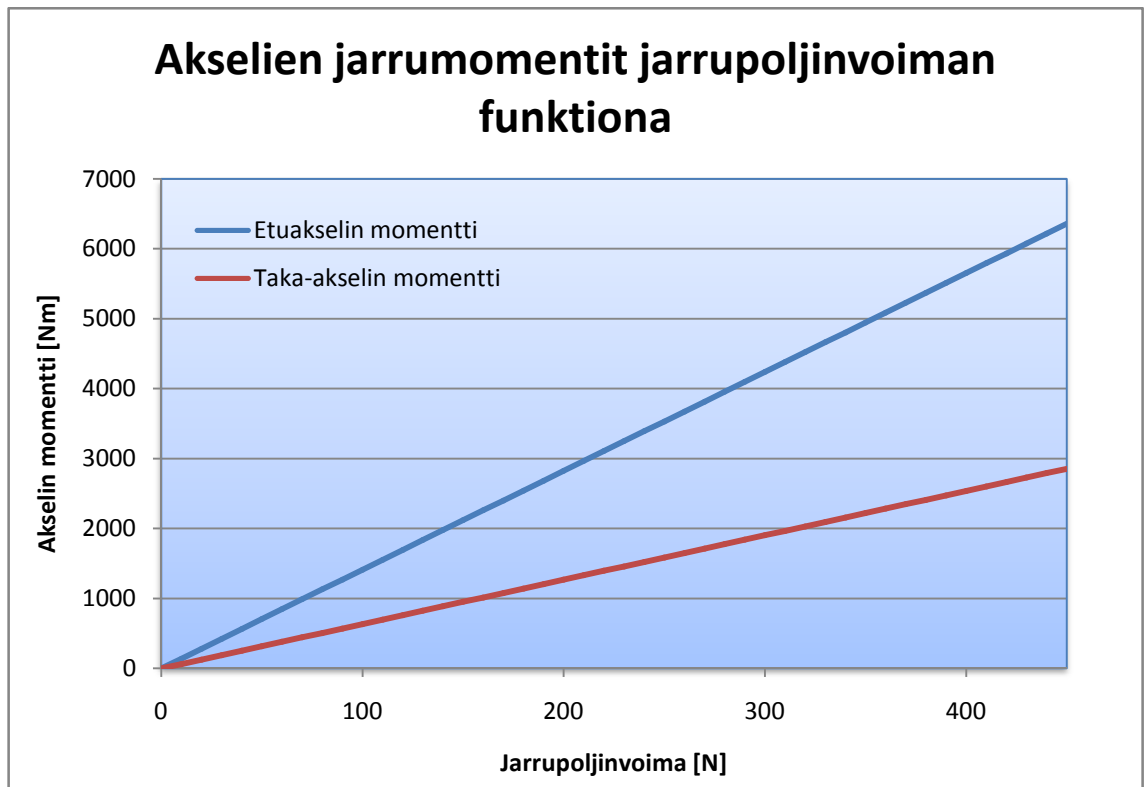
Kuva 49. ABS-vapautusviive ajallisesti pyörintänopeuden saavuttamiseksi hitausmomentin funktiona



Kuva 50. ABS-vapautusviive matkana pyörintänopeuden saavuttamiseksi hitausmomentin funktiona

5.6.5 Akselien teoreettiset jarrumomentit jarrupoljinvoiman funktiona

Akselin jarrujen tuottama vääntömomenttia voidaan kuvata jarrupoljinvoiman funktiona. Tällä tavoin on helposti nähtävissä että esim. 300 N:n jarrupoljinvoimalla etuakselin jarrut tuottavat n. 4200 Nm:n vääntömomentin ja taka-akselin jarrut n. 2000 Nm:n vääntömomentin (kuva 51).



Kuva 51. Akselien teoreettiset jarrumomentit jarrupoljinvoiman funktiona

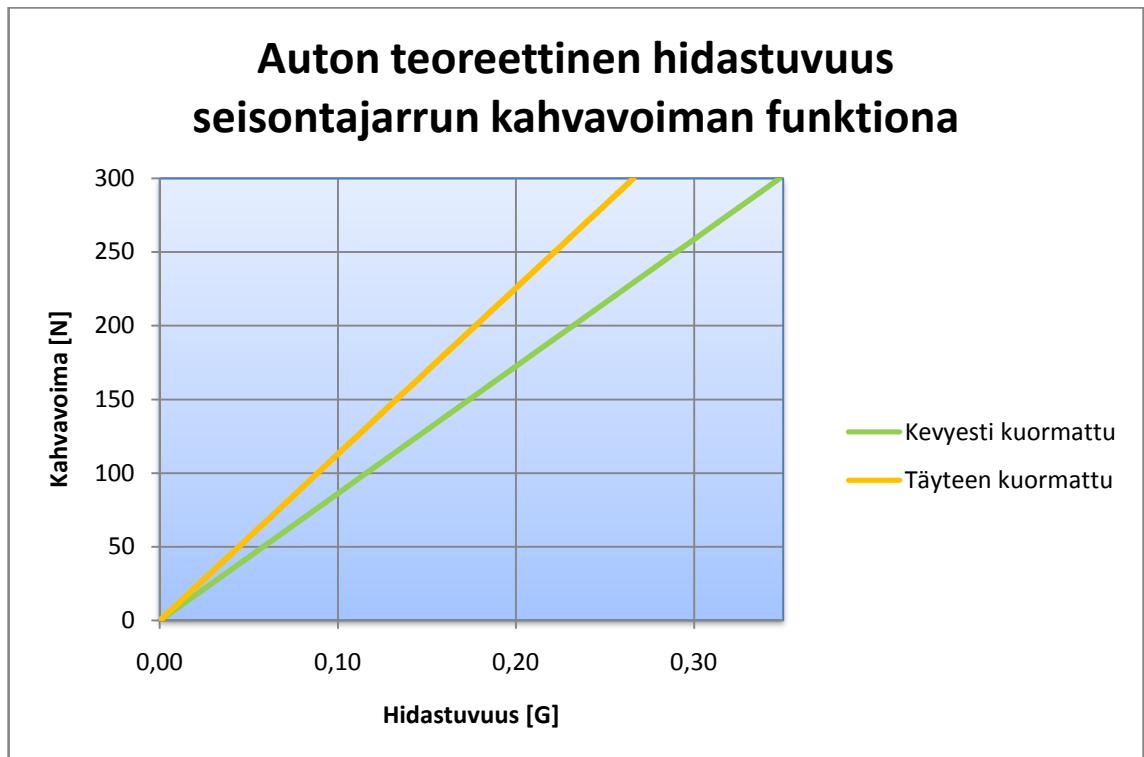
5.7 Seisontajarrun teoreettinen suorituskyky

Samaa kohdassa 5.6 esiteltyä laskuria voidaan käyttää myös seisontajarrun teoreettisen suorituskyvyn arvioimiseen.

5.7.1 Auton hidastuvuus seisontajarrun kahvavoiman funktiona

Auton teoreettinen hidastuvuus voidaan laskea myös seisontajarrun kahvavoiman funktiona, mikäli tiedetään seisontajarrukahvan ja pyöräjarrussa sijaitsevan seisontajarrumekanismin välityssuhteet. 250 N:n kahvavoimalla saavutetaan kevyesti kuormatulla

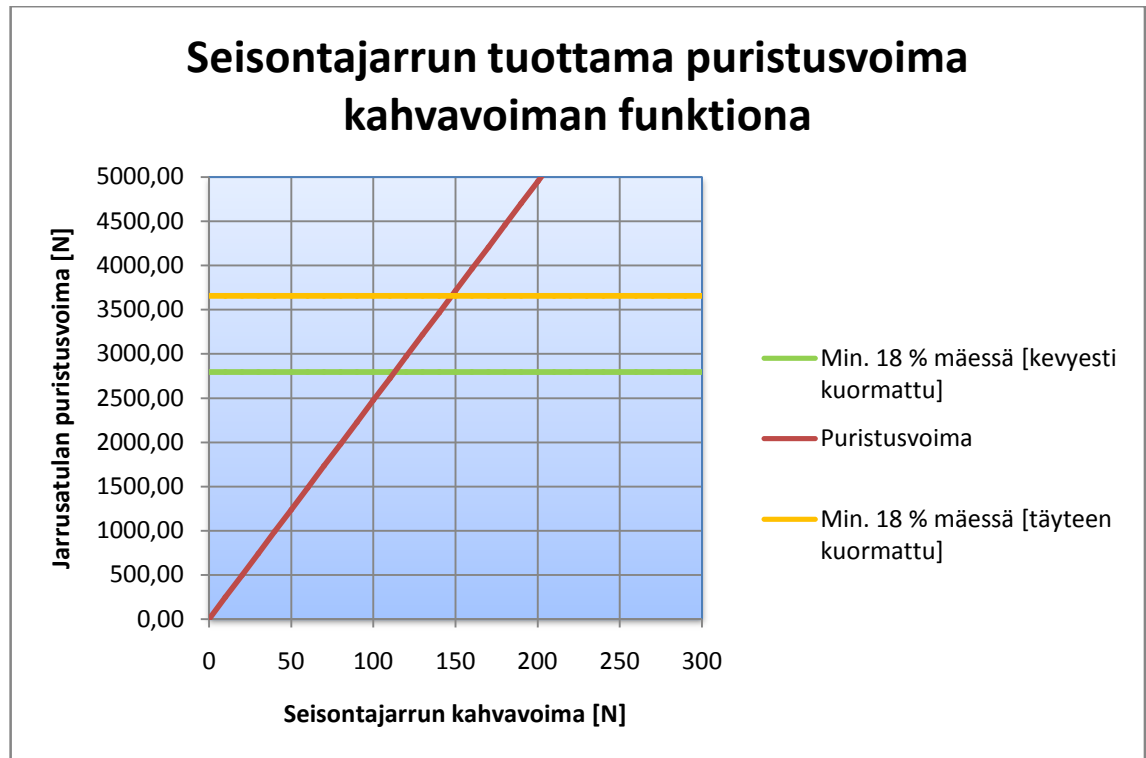
autolla n. 0,28 G:n hidastuvuus ja täyteen kuormatulla autolla n. 0,22 G:n hidastuvuus (kuva 52).



Kuva 52. Auton teoreettinen hidastuvuus seisontajarrun kahvavoiman funktiona

5.7.2 Auton pysyminen paikallaan mäessä seisontajarrun avulla

Kuten 2.5.6 kohdassa todetaan lakivaatimuksista, on seisontajarrujärjestelmän pystyttävä pitämään kuormitettu ajoneuvo paikallaan ylä- tai alamäessä, jonka kaltevuus on 18 prosenttia. Kuvassa 53 nähdään tarvittava teoreettinen seisontajarrun kahvavoima, jotta auto pysyy paikallaan pinnalla, jonka kaltevuus on 18 %. Kevyesti kuormattu auto vaatii n. 115 N:n kahvavoiman, kun täysin kuormattu auto vaatii n. 150 N:n kahvavoiman.



Kuva 53. Seisontajarrun teoreettisesti tuottama puristusvoima jarrusatulassa kahvavoiman funktiona

6 Jarrujärjestelmälle suoritettut käytännön mittaukset

Mitoitusesimerkin autolle suoritettujen mittauksien tarkoituksena on todeta mitoitusesimerkin auton jarrujärjestelmän toimivuus sekä verifioida teoreettisten tulosten oikeellisuutta. Mittauksissa päätettiin painottaa jarrutustuntuman mittaamiseen, koska siitä ei löytynyt aikaisempaa tutkimustietoa.

6.1 Painopisteen sijainti auton pituus-suunnassa

Auto kuormattiin vastaamaan ajotilannetta asettamalla kummallekin etupenkille 70 kg painavat vedellä täytetyt mallinuket. Taulukosta 9 nähdään mittauksen tulokset painopisteen sijainnista auton pituussuunnassa.

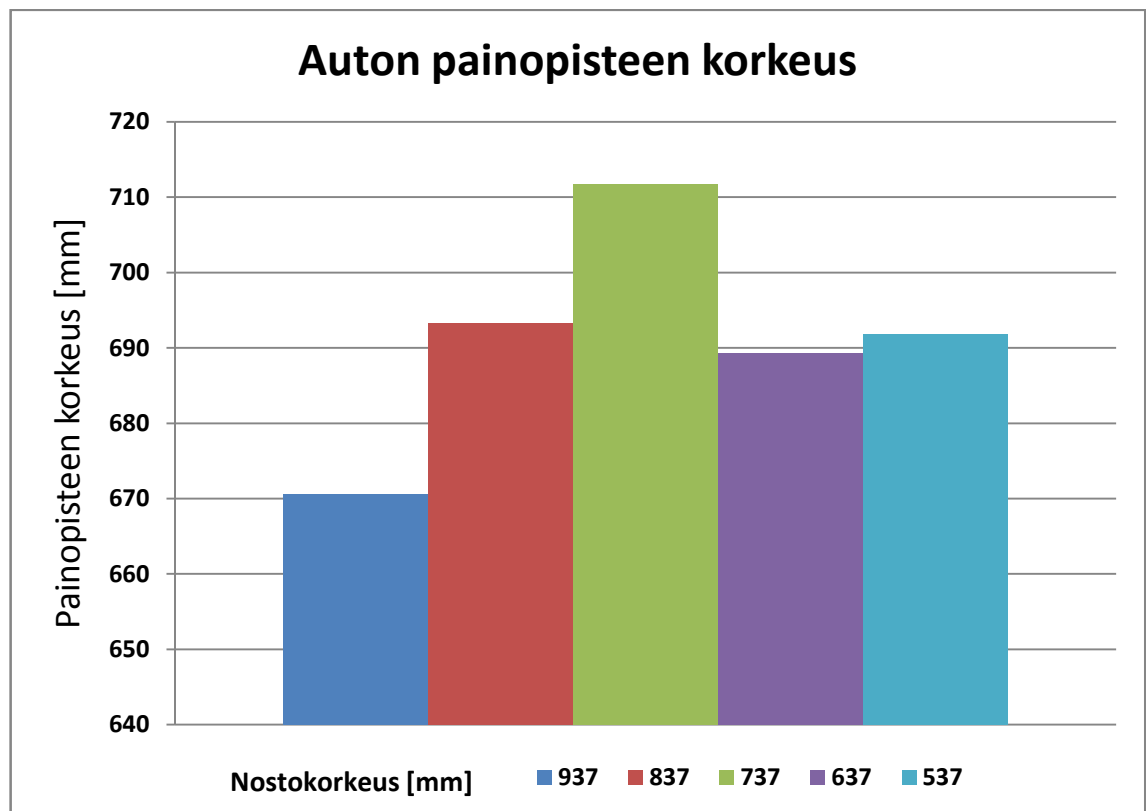
Taulukko 9. Mitoitusesimerkin auton painopisteen sijainti pituussuunnassa

Auton kokonaispaino	1574 kg
---------------------	---------

Akselipainot	etuakseli 838 kg ja taka-akseli 938 kg
Painon jakautuminen prosentuaalisesti	etuakseli 60 % ja taka-akseli 40 %

6.2 Painopisteen sijainti auton korkeus-suunnassa

Auton painopisteen korkeus mitattiin viidellä eri etuakselin nostokorkeudella, jotta saavutettiin parempi mittaustarkkuus. Kuvasta 54 nähdään painopisteen korkeus maanpinnasta millimetreinä auton viidellä eri nostokulmalla. Laskemalla näiden viiden eri mittauksen keskiarvo, saadaan tulokseksi 691 mm.



Kuva 54. Mitoitusesimerkin painopisteen korkeus etuakselin viidellä eri nostokorkeudelle

6.3 Jarrujärjestelmän suorituskyky

Mitoitusesimerkissä käytetyn auton jarrujärjestelmän suorituskykyä mitattiin myös käytännössä. Mittaukset painottuivat auton hidastuvuuden saavuttamiseen jarrupoljinvoiman tai seisontajarrun kahvavoiman funktiona. Mittaus päätettiin suorittaa myös muu-

tamalle muulle autolle, jotta saatiin parempi kokonaiskuva eri autojen mahdollisista eroista.

6.4 Jarrutusmatka

Jarrutusmatkaa ei saatu mitattua ja lähteenä käytetään Tekniikan Maailma suorittamaa mittausta, jossa oli saatu jarrutusmatkaksi 100 km/h:n nopeudesta jarrutettaessa kuivalla asfalttipinnalla kuljettajan lisäksi yhden hengen kuormalla tasan 40 metriä [20, s. 50].

6.5 Auton jarrutustuntuma

Mittauksissa päätettiin panostaa auton jarrutustuntuman mittaamiseen, koska se on perinteiselle kuluttajalle yksi auton jarrujärjestelmän konkreettisimmista asioista. Auton jarrutustuntumaa mitattiin yhteensä seitsemällä eri autolla, jotta saatiin käsitys jarrupoljinvoimasta hidastuvuuden funktiona eri autotyypeillä. Mittaus suoritettiin Valmet Automotiven asfalttipäällysteisellä testiradalla, missä suoritettiin jokaisella autolla erityyppisiä jarrutuksia n. 100 km/h:n ajonopeudesta 6 - 10 kertaa. Näistä jarrutuksista laskettiin harmoninen keskiarvo, jolloin saadaan trendin mukainen painotus.

6.5.1 Mittauslaitteisto

Mittauslaitteena käytettiin Dewetron DEWE-201 -mittalaitetta, jolla tallennettiin kolmelta eri antureilta saatua tietoa ajan funktiona: voima-anturi, kiihtyvyyssanturi ja GPS-nopeusanturi. Mittalaite kiinnitettiin kaikissa autoissa auton etupenkkiin tukevasti ja mittalaitteen näyttö tuulilasiin imukupeilla, kuten kuvista 55 ja 56 voidaan nähdä.



Kuva 55. DEWE-201 -mittalaite kiinnitettyä tukevasti auton etupenkkiin



Kuva 56. DEWE-201 -mittalaitteen näyttö kiinnitettyä kahdella imukupilla auton tuulilasiin

Jarrupoljinvoiman mittaamiseen käytettiin voima-anturia, joka perustuu neljään venymäliuskaan, jotka on kytketty ns. Wheatstonen siltaan. Voiman mittaaminen venymäliuskoilla on todennäköisesti luotettavin ja tarkin tapa mitata voimaa. Toiminta perustuu siihen, että mekaanisen voiman vaikutuksesta syntyvä jännitys σ ja venymä ε riippuvat toisistaan silloin, kun toimitaan alueella, jolla Hooken laki on voimassa. Tällöin Hooken lain mukaisesti

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma}{E}$$

jossa riippuvuuskerroin E on elastinen moduuli. Venymäliusken menetelmää voidaan pitää epäsuorana mittausmenetelmänä, koska siinä ei mitata suoraan vaikuttavasta voimasta syntyvää venymää vaan pikemminkin paikallisesti syntyvää venymää. [21, s. 80]

Voima-anturi kiinnitettiin kenkään (kuva 57), jolloin se sijaitsi kengänpohjan ja jarrupolkimen välissä välittäen jalasta tulevan voiman jarrupolkimeen. Voima-anturi kalibroitiin asianmukaisilla punnuksilla.



Kuva 57. Kenkään kiinnitetty voima-anturi

Kiihtyvyyssanturina käytettiin Bosch Motorsportin valmistamaa YRS 2 -mallin anturia (kuva 58). Anturi kiinnitettiin jokaisessa autossa auton keskikonsoliin, jolloin se sijaitsi mahdollisimman lähellä auton painopistettä.

Mitattava suure on kiihtyvyys a , joka tässä tapauksessa ilmaistaan suhteessa maan vetovoimakiihtyvyyteen ($1\text{ }G \approx 9,81 \frac{m}{s^2}$). Kiihtyvyyssanturi mittaa sitä voimaa F , joka syntyy, kun hitausmassaan m vaikuttaa kiihtyvyys a . [21, s. 69.]

$$F = m * a$$

Anturin asentamisen jälkeen jokaisessa autossa suoritettiin kiihtyvyyssanturin kalibrointi ja tarvittaessa kalibrointi suoritettiin myös mittausten välissä.



Kuva 58. Kiihtyvyyssanturi kiinnitettynä auton keskikonsoliin

Auton tarkka ajonopeus saatiin tietoon GPS-anturin avulla, jolloin jarrutus voitiin aloittaa aina samasta ajonopeudesta (kuva 59). GPS-anturin tarkkuus ei tosin riittänyt jarrutuksessa tapahtuvaan nopeuden muutokseen, joten sitä käytettiin ainoastaan oikean alkunopeuden määrittämiseen.



Kuva 59. GPS-anturi kiinnitettynä auton kattoon

6.5.2 Mittauksen lähtökohta

Kaikissa autoissa oli käytössä alkuperäiskoon mukaiset kesärenkaat, ellei toisin ole mainittu. Kaikista autoista tarkistettiin rengaspaineet, renkaiden urasyvyys ja kitkajarrujen kunto, eikä niistä löytynyt puutteita tai erityistä mainittavaa. Testi suoritettiin huhtikuussa vuonna 2012, jolloin ulkolämpötila vaihteli +4:n ja +8 asteen välillä.

Autoina käytettiin seuraavia autoja:

- Audi A4 Avant 2,0 Tdi vm. 2010 (aj. 49724 km)
- Saab 9-3 1.8t vm. 2007 (aj. 97710 km)
- Saab 9-3 1.9 TTiD vm. 2011 (aj. 16000 km) kitkarenkaat
- Volkswagen Caddy 2.0 Sdi vm. 2006 (aj. 58444 km)
- Volkswagen Golf Variant 1.6 Tdi vm. 2011 (aj. 62982 km)

- Volkswagen Tiguan 2.0 Tdi vm. 2012 (aj. 12000 km)
- Fisker Karma vm. 2012 (aj. 13054 km) kitkarenkaat

6.5.3 Mittaustulokset

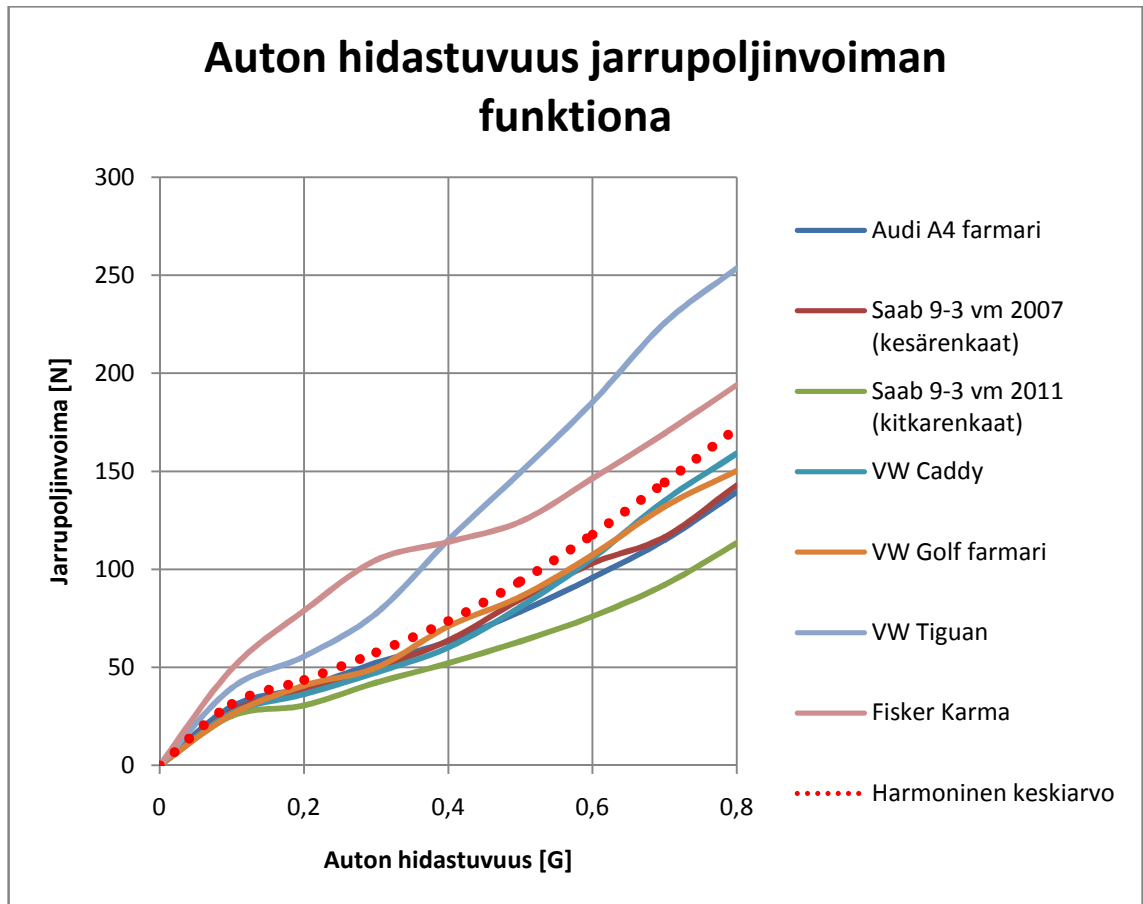
Kuvaan 60 on kerätty harmoninen keskiarvo jokaisella autolla suoritetuista mittauksista. Mittauksen tulokset rajoitettiin hidastuvuuden osalta VW Caddyn tuloksien puolesta 0,8 G:hen, vaikka moni autoista ylsikin yli 1,0 G:n hidastuvuuksiin. Lisäksi siihen on merkitty harmoninen keskiarvo kaikkien autojen tuloksista.

Suurin hidastuvuus suhteessa jarrupoljinvoimaan saavutettiin Saab 9-3:lla, joka oli varustettu kitkarenkailla, jolloin 0,8 G:n hidastuvuus saavutettiin keskimäärin ainoastaan 113 N:n voimalla. Toisaalta kyseinen auto oli myös mitatuista autoista vähiten ajettu, mikä voi olla osasy syy osittain yllättävään tulokseen. Suurin poljinvoima vaadittiin VW Tiguanilla, jolla 0,8 G:n hidastuvuus vaati keskimäärin 254 N:n voiman.

Fisker Karman valmistajan tietojen mukaan auto käyttää jarrutuksessa 0,3 G:n hidastuvuuteen asti sähkömoottoria ja sen jälkeen perinteistä jarrujärjestelmää. Mittaustuloksissa näkyy pieni notkahdus 0,3 G:n kohdalla, ja jää arvailuksi, johtuuko tämä nimenomaan edellä mainitusta seikasta.

Tulokset osoittavat, että tämän tyyppisen testauksen avulla voidaan nähdä ainoastaan trendi eri autojen välillä. Mittaus ei suoraan sovellu vertaamaan autoja toisiinsa, koska jos näin haluttaisiin toimia, pitäisi lähtökohdan olla kaikille autolle sama. Käytännössä tämä tarkoittaa, että autojen tai vähintään jarrukomponenttien pitäisi olla uusia. Mikäli mittaus haluttaisiin toteuttaa käytetyille autoille, olisi suositeltavaa ottaa otanta muutamasta eri käytetystä autosta. Toisaalta tämä testi suoritettiin satunnaisille autoille, joten testi kuvaa hyvin otantaa autoista, jonka kuka tahansa saattaisi omistaa. Mittauksessa oli myös tärkeää huomioida rengas- ja jarrulämmöt, koska niillä on suora vaikutus testin tuloksiin. Tätä varten jarrutuksien välissä suoritettiin aina riittävä jäähdytys.

Tällaisessa testissä olisi tärkeää mitata myös polkimen liikematkaa, mutta siihen eivät resurssit tämän insinööritoiminnan puitteissa riittäneet, joten panostettiin ainoastaan tärkeimpien tietojen mittaamiseen.



Kuva 60. Jarrutustuntuman mittaustulokset eri autoilla

Subjektiiivisesti arvioituna paras jarrutustuntuma oli Audi A4:ssa, jossa jarrutuksessa tapahtuva korin niaus painonsiirron ansiosta oli huomattavasti pienempi kuin muilla autoilla. Audilla useassa eri jarrutuksessa saavutettu suurin hidastuvuus oli 1,4 G.

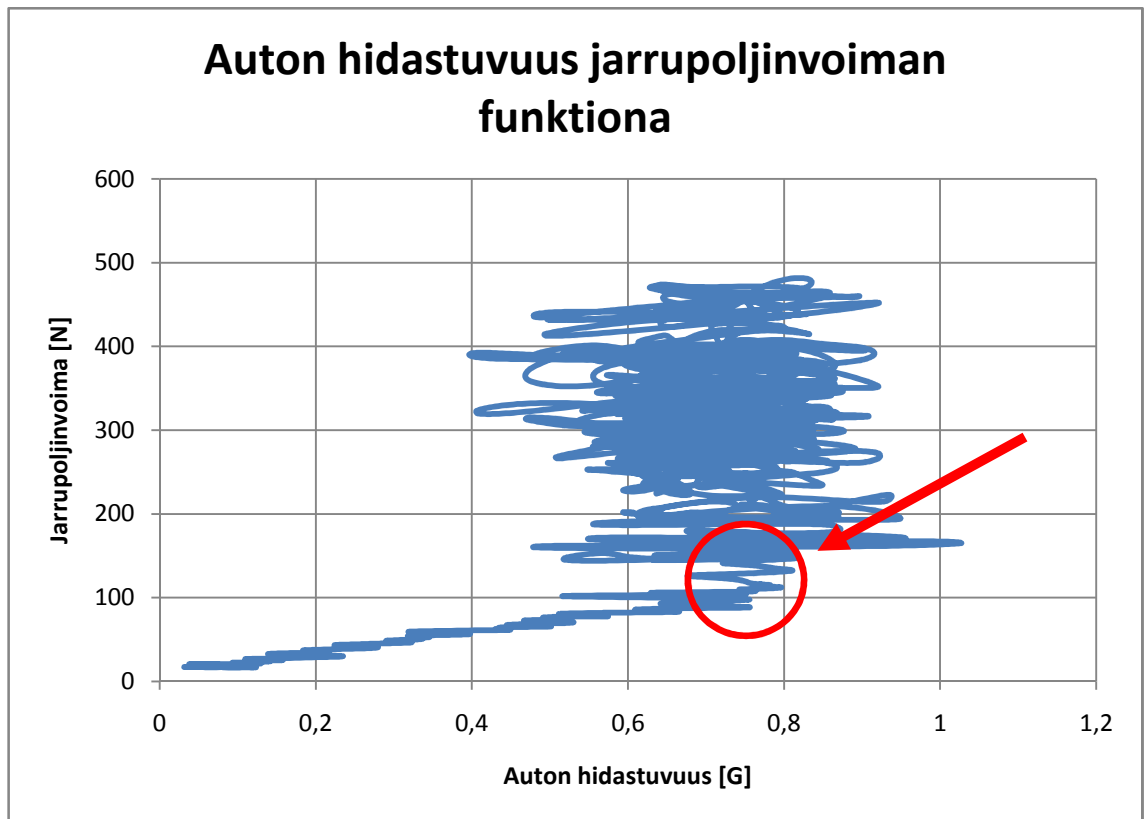
Mittaustulokset näyttävät selvän trendin tarvittavan jarrutusvoiman ja sillä saavutetun hidastuvuuden suhteelle (taulukko 10).

Taulukko 10. Harmoninen keskiarvo autojen saavuttamille hidastuvuuksille jarrupoljinvoiman funktiona

Jarrupoljinvoima [N]	31	44	58	74	94	118	144	172
Auton hidastuvuus [G]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8

6.5.4 Mitoitusesimerkkiauton jarrutustuntuman mittaustulokset

Yksittäisestä jarrutuksesta saadusta datasta selviää, että tietyn jarrupoljinvoiman jälkeen hidastuvuus ei enää lisäännä, vaan auto on saavuttanut maksimihidastuvuuden (kuva 57).

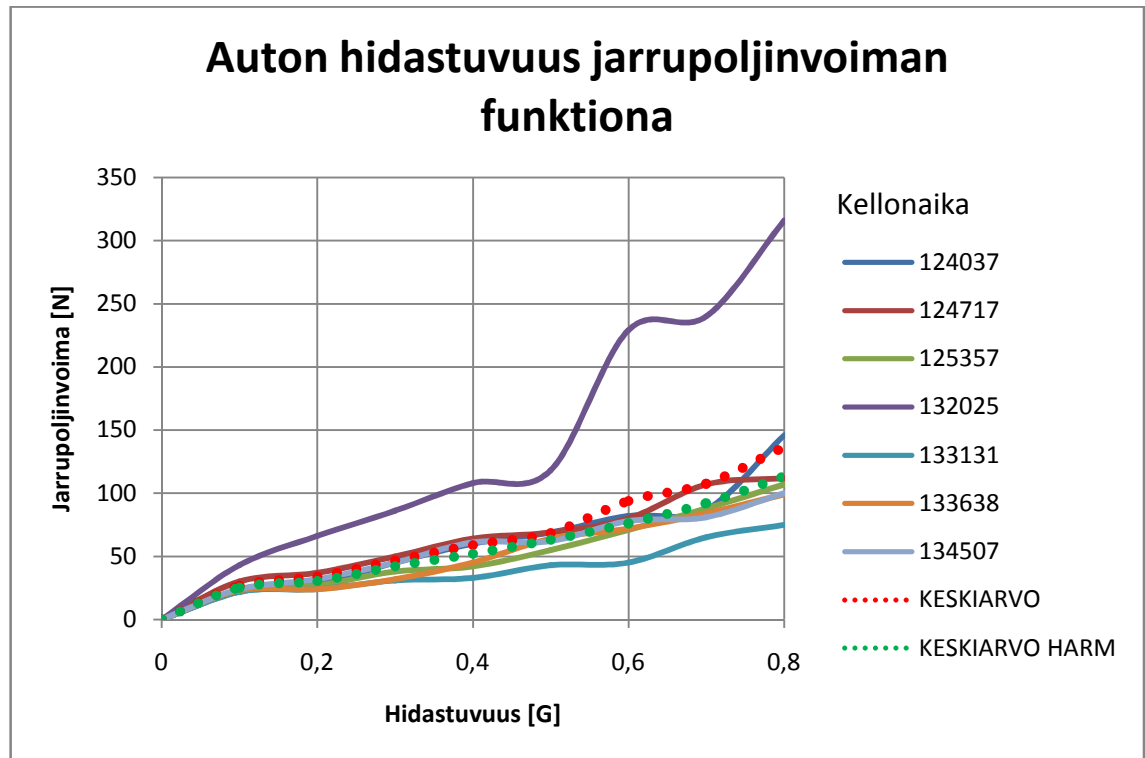


Kuva 61. Mitoitusesimerkkiauton hidastuvuus jarrupoljinvoiman funktiona yksittäisestä jarrutuksesta

Mittauksessa tehtiin yhteensä seitsemän jarrutusta suoralla tiellä. Mittauksesta selvisi että mikäli jarrupoljinta painaa jo tietoisesti ylikovaa, ei sillä saavuteta mitään hyötyä (kuva 58). Paras ja tehokkain jarrutus saavutetaan kevyellä, mutta riittävällä jarrupoljinvoimalla. Toisaalta nykypäivän lukkiutumattomien jarrujärjestelmien ansiosta mitään ei hävitä, mikäli jarrupoljinta painettaisiinkin "ylikovaa".

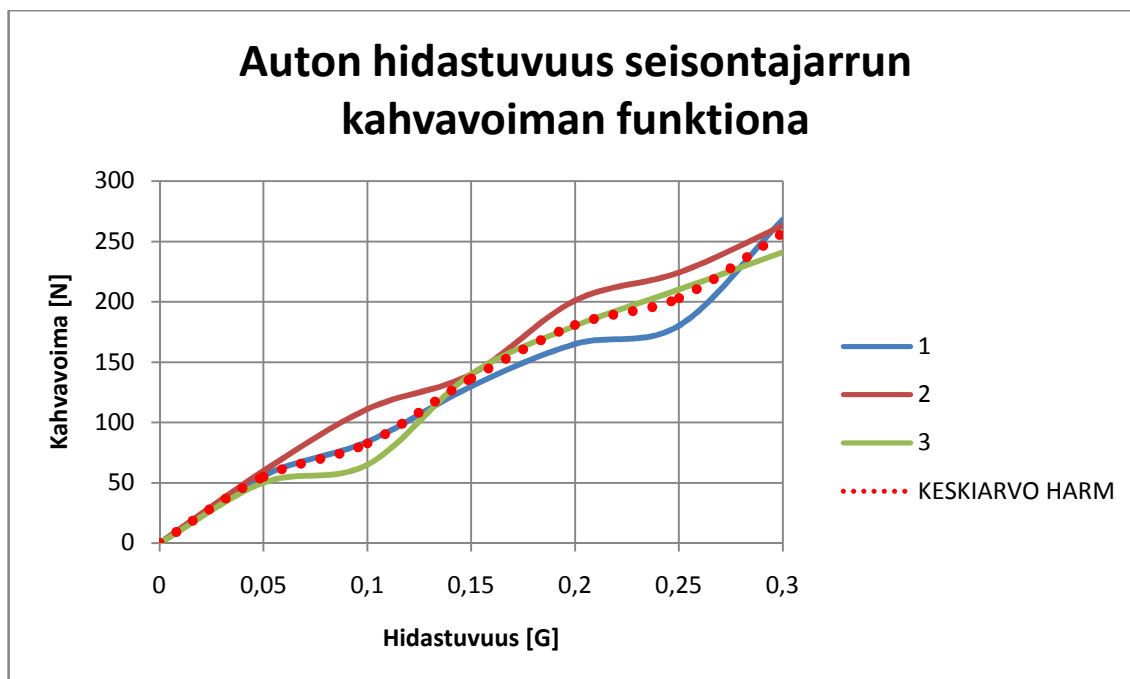
Aritmeettisen keskiarvon sijaan mittauksien analysoinnissa käytettiin harmonista keskiarvoa, joka saadaan kun lasketaan lukuarvojen käänteislukujen aritmeettisen keskiar-

von käänteisluku. Tällä tavoin saadaan trendin mukainen painotus keskiarvoon eikä yksittäinen "vääristymä" mittauksissa aiheuta keskiarvoon niin suurta merkitystä, kuin aritmeettinen keskiarvo vaikuttaisi.



Kuva 62. Mitoitus esimerkissä esitellyn auton hidastuvuudet jarrupoljinvoiman funktiona seitsemässä eri jarrutuksessa

Autosta mitattiin samalla menetelmällä myös auton hidastuvuutta seisontajarrun kahvavoiman funktiona. Ainoa muutos testijärjestelyyn oli, että voima-anturi oli nyt asennettuna kahvan ja käden väliin, jolloin kaikki voima välittyi kahvaan voima-anturin kautta. Tuloksista havaittiin, että autolla saavutettiin keskimäärin maksimissaan n. 0,3 G:n hidastuvuus pelkällä seisontajarrulla jarruttamalla. Kuvasta 60 nähdään tulokset kolmesta eri jarrutuksesta.



Kuva 63. Mitoitusesimerkissä käytetyn auton hidastuvuus seisontajarrun kahvavoiman funktiona

Mitatussa autossa seisontajarru on asennettu normaaliin tapaan taka-akselille ja jarruttaessa seisontajarrulla saattaa vaarana olla takapyörien lukkiutuminen ja auton hallinnan menettäminen. Mittauksissa havaittiin kuitenkin, että auton suuntavakaus on helppo säilyttää vaikka takapyörät menisivätkin hetkellisesti lukkoon, koska kahvavoimaa on helppo säädellä. Suurimmat riskit hätätilanteessa, jolloin seisontajarrua saatetaan joutua käyttämään, lienevät varmasti siinä, saako kuljettaja pidettyä seisontajarrun kahvan lukitusnapin pidettyä painettuna jarrutustilanteessa ja toisaalta riittääkö kuljettajan voima nostamaan kahvaa riittävän kovalla voimalla, jotta auton maksimihidastuvuus seisontajarrulla saavutetaan. Kyseisessä autossa 0,3 G:n hidastuvuuden saavuttamiseksi tarvittiin keskimäärin n. 256 N:n voima, joka vastaa istualtaan yhdellä kädellä 26 kg:n painoisen esineen nostamista maasta.

7 Yhteenveto ja päätelmät

7.1 Insinööriyön yhteenveto

Tämän insinööriyön tarkoituksena oli perehtyä M1-ajoneuvoluokan jarrujärjestelmän suunnitteluun, mitoittamiseen ja testaamiseen. Insinööriyössä käytiin aluksi läpi jarru-

järjestelmän toiminnan peruseriaatteen, turvallisuus ja lain asettamat vaatimukset. Tämän jälkeen siirryttiin komponenttien mitoittamiseen ja niihin vaikuttaviin tekijöihin, kuten auton ominaisuudet ja ergonomia. Testaus on myös yksi tärkeä asia tuotekehityksessä, joten myös jarrujärjestelmän testausta ja riskianalyysistä käsiteltiin.

Insinöörityössä haluttiin myös tehdä tutkimustyötä ja näin meneteltiin esittelemällä henkilöauton jarrujärjestelmän komponenttien mitoitus-esimerkki. Esimerkissä käytiin läpi kaikki jarrukomponenttien tehollisiin mittoihin vaikuttavat tekijät esimerkkiauton kautta. Tämän jälkeen saman mitoitus-esimerkkiauton jarrujärjestelmän teoreettista toiminnan ja suorituskyvyn arvioimista helpottamaan käytettiin Microsoft Excel -taulukkolaskentaohjelmaan pohjautuva laskuria, jonka laskukaavat perustuvat fysiikan lakeihin.

Laskurin tuloksien verifiointiksi mittaus-esimerkissä käytetyn auton jarrujärjestelmän suorituskyyä arvioitiin suorittamalla käytännön mittauksia. Mittauksissa selvisi, että laskurin tuloksia voidaan pitää realistisina ja tarpeen vaatiessa laskuriin voidaan lisätä korjauskertoimia, joilla laskurin tuloksista saadaan tarkempia. Käytännön mittauksissa päätettiin mitata esimerkkiauton lisäksi jarrutustuntumaa myös muista erityyppisistä ja erimerkkisistä autoista.

7.2 Teoreettisen ja käytännön tuloksien arvioiminen

Mitoitus-esimerkissä käytetyn auton EU:n direktiivin mukaiset kitkakäyrät eivät vastaa käytäntöä, koska autossa on elektronisesti säätyvä jarruvoimanjako. Ilman EBD:tä auton takajarrut lukkiutuisivat ennen etujarruja todella herkästi. Uusien autojen jarrujärjestelmien toiminnan ja suorituskyvyn analysointi tuottaakin haasteita, koska valmistajat eivät luovuta elektronisten järjestelmien säätöarvoja ulkopuolisille, vaikka kyse olisi opiskelijan opinnäytetyöstä. Jarrutusmatka oli arvioitu teoreettisesti olevan n. 40 metriä, kun jarrutus aloitetaan nopeudesta 100 km/h. Tekniikan Maailma -lehden suorittaman testin mukaan sama tulos saatiin myös käytännössä, joten jarrutusmatkan arviointia voidaan pitää melko tarkkana.

Auton hidastuvuuden arvioiminen jarrupoljinvoiman funktiona on mielenkiintoista myös teoriassa, koska sillä on erittäin suuri vaikutus auton jarrutustuntumaan. Käytännön

mittauksista selvisi, että jarrutustuntuma on lineaarinen ja lähes yhtäläinen erityyppisillä autoilla. Erot saattavat syntyä jo pelkästään jarrulevyjen ja jarrupalojen kunnosta, koska sillä on suuri vaikutus niiden väliseen kitkakertoimeen ja siten jarruvoimantuotokykyyn. Jarrutustuntuman arvioiminen teoriassa on haastavaa, koska useissa uusissa autoissa jarrutehostimen tehostusvaikutus saattaa vaihdella jopa 5 - 12-kertaisen tehostuksen välillä. Teoriassa arvioitiin saavutettavan 0,8 G:n hidastuvuus 220 N:n jarrupoljinvoimalla, mutta käytännössä ilmeni, että kyseinen hidastuvuus saavutettiin keskimäärin n. 140 N:n jarrupoljinvoimalla. Syynä tähän voi olla esimerkiksi se että todellisuudessa jarrutehostimen tehostusvaikutus on suurempi mitä teoreettisissa laskuissa käytettiin.

Seisontajarrulla suoritettun jarrutuksen tehokkuuden arvioiminen teoriassa osoittautui lähes todellisuutta vastaavaksi. Teoriassa 250 N:n kahvavoimalla arvioitiin saavutettavan 0,3 G:n hidastuvuus ja käytännön mittaukset osoittivat keskimäärin saman tuloksen saavuttamisen.

7.3 Jarrujärjestelmien tulevaisuus

Jarrujärjestelmien tulevaisuus on vielä tällä hetkellä erittäin suuri kysymys. Mitä enemmän asiaa tutkii eri valmistajien näkökulmasta, sitä enemmän rivien välistä paistaa se, että valmistajat ovat selvästi varuillaan asian suhteen, koska selvää tulevaisuuden näkymää autoalalle ei ole kenelläkään. Näyttää kuitenkin vahvasti siltä, että jo pitemmän aikaa kehityksen alla olleet Brake By Wire -järjestelmät ovat tulossa jossain vaiheessa autoihin – ainakin osittain. BBW mahdollistaa pyöräjarrujen aktivoimisen ja ohjaamisen elektronisesti ilman perinteistä hydraulijärjestelmää (kuva 64).



Kuva 64. Sähköisesti ohjattava jarrusatula [kuva BWI Group]

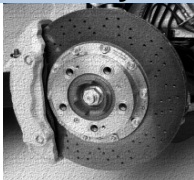
Vaikuttaisi siltä, että elektronisesti ohjattuja pyöräjarruja kokeillaan ensin taka-akselilla, missä jarrujen merkitys on pienempi kuin etuakselilla. Mikäli näin tapahtuu, voidaan käyttöjarru ja jo jonkin aikaa autoissa ollut elektroninen seisonajarru yhdistää. Vaikka yleinen luulo on, että takajarrujen merkitys on pienempi dynaamisen painonsiirron ansiosta, voidaan todeta, että tämä on erittäin paljon tilanneriippuvainen ilmiö. Kuivalla asfaltilla jarruvoimien jako saattaa olla edessä jopa 80 % ja takana vain 20 %. Tilanne kuitenkin muuttuu, kun keliolosuhteet muuttuvat ja tien pinta on esimerkiksi jäätynyt. Tällöin painonsiirtoa ei saada läheskään niin paljon kuin kuivalla asfaltilla ja taka-akselin jarrujen merkitys lisääntyy huomattavasti. Takajarrut ovat myös tärkeämmät auton stabiiliteetin kannalta, joten asia ei olekaan niin yksinkertainen kuin yleisesti luullaan. Tähän kun lisätään vielä hydraulijarrujärjestelmän ja energian talteenoton yhdistäminen, asia saa aivan uudet mittasuhteet. Voidaan vain kuvitella, miten paljon jarrukomponentti- ja autovalmistajat käyttävät resursseja tämän asian kehittämiseen. Auton jarrujärjestelmällä kun on koko autokehityksen historian ollut vain yksi merkitys – hidastaa auton liikettä. Kun jarrutusenergian talteenotto keksittiin, sai jarrujärjestelmä samalla myös uuden käyttötarkoituksen, sähköautojen akkujen lataamisen. Samalla jarrujärjestelmästä tulikin yksi auton ekologisuuden kulmakivistä.

Lähteet

- 1 Limpert, Rudolf. 2009. Brake Design and Safety. Second edition. Warrendale, PA: SAE International.
- 2 Braking theory. 2010. TRW Aftermarket Automotive. Yrityksen lähettämä digitaalinen dokumentti.
- 3 Kytö, Petri. 2011. Jarrujärjestelmät ja pidonhallinta. Kurssimateriaali. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 4 Limpert, Rudolf. 1999. Motor Vehicle Accident Reconstruction and Cause Analysis. Fifth edition. Warrendale, PA: SAE International
- 5 Euroopan yhteisöjen komission direktiivi 98/12/EY.
- 6 Tuononen, Ari & Koisaari, Tapio. 2010. Ajoneuvojen dynamiikka. Helsinki: Autoalan Koulutuskeskus Oy.
- 7 Autoteknillinen taskukirja. 1993. 5. painos. Jyväskylä: Autoalan Koulutuskeskus Oy.
- 8 Lampton, Christopher. How Electronic Brake Force Distribution Works. Verkkodokumentti. <<http://auto.howstuffworks.com/car-driving-safety/safety-regulatory-devices/electronic-brake-force-distribution>>. Luettu 20.3.2012.
- 9 HeiBing, B., Ersoy, M. 2011. Chassis Handbook. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
- 10 Hilton, J. 2008. Braking Energy Storage and Recovery. ATZ Autotechnology 3/2008, s. 20–23.
- 11 Abuelsamid, S. 2010. How do hybrids and electric vehicles blend regenerative and friction braking. Verkkodokumentti.

- <<http://green.autoblog.com/2010/02/18/greenlings-how-do-hybrids-and-electric-vehicles-blend-regenerat/>>. 18.2.2010. Luettu 27.2.2012.
- 12 Porsche 911 Carrera. 2011. Porsche AG. Myyntiesite.
 - 13 Hopfinger, Peter. 2012. Head of whole vehicle testing, Valmet Automotive Inc, Uusikaupunki. Haastattelu 17.2.2012.
 - 14 Macey, S. & Wardle, G. 2009. H-POINT, The Fundamentals of Car Design & Packaging. Pasadena, CA: Art Center College of Design.
 - 15 Stratthaus, Manfred. 2012. Product Development, Continental Aftermarket GmbH. Uusikaupunki. Haastattelu 1.3.2012.
 - 16 Reimpell, J., Stoll, H. & Betzler, J. W. 2011. The Automotive Chassis: Engineering principles. Second edition. Warrendale, PA: SAE International.
 - 17 Katsastuksen arvosteluperusteet v. 3.0. Dnro. 937/208/2007. 2007. Liikenteen turvallisuusvirasto.
 - 18 Autovalmistajan korjaamokäsikirja jälleenmyyjille. 2012. SAAB Automobile Finland. Verkkodokumentti. <<https://iris.saabdealer.org/>>. Luettu 30.1.2012.
 - 19 Manual Brake Assist (MBA). 2011. TRW Automotive. Verkkodokumentti. <http://www.trw.com/braking_systems/mechanical_brake_assist/>. Luettu 30.1.2012.
 - 20 Ahonen, Hannu. 2009. Premium-luokan dieselmallit. Tekniikan Maaailma 1/2009, s. 50.
 - 21 Juhala, Matti. 2009. Robert Bosch GmbH: Autojen anturit. Helsinki: Autoalan Koulutuskeskus Oy.

Raportti mitoitusesimerkissä käytetyn auton jarrujärjestelmästä

Brake system calculation		Report
		3.5.2012
Customer / Project		
Name:	Valmet Automotive	
Email:	firstname.lastname@valmet-automotive.com	
Phone:	+358 20 484 180	
Vehicle & component information		
Vehicle identification:		Example car
Lightly loaded (car + driver)		Fully loaded (car + fully loaded)
Vehicle mass Car + driver 1574 kg		Vehicle mass Car + driver 2060 kg
Weight distribution Front axle 60 % Rear axle 40 %		Weight distribution Front axle 55 % Rear axle 45 %
Center of gravity height 690 mm		Center of gravity height 690 mm
Wheel, tyre and wheelbase		
Tyre identification:		225/45 R17
Tyre dynamic radius Front 307,8 mm Rear 307,8 mm		Wheelbase 2675 mm
Master cylinder and brake caliper		
Master cylinder diameter First 25,4 mm Second 25,4 mm		Hydraulic circuit type <input type="text" value="Diagonal"/>
Front caliper piston diameter 1. pair 57 mm 2. pair 0 mm 3. pair 0 mm		Rear caliper piston diameter 1. pair 38 mm 2. pair 0 mm 3. pair 0 mm
Brake disc		
Front disc Outer diameter 302,00 mm Inner diameter 182,00 mm		Rear disc Outer diameter 292 mm Inner diameter 202 mm

Brake pad

	Friction of coefficient
Front	0,55
Rear	0,55

Brake pedal

Maximum pedal force	300	N
Pedal ratio	3,86	
Brake booster coefficient	6	

BRAKING ANALYSIS WITH LIGHTLY LOADED VEHICLE

Tire / road $\mu =$ **0,95**

	Generated torque from disc	
Front	2048	Nm
Rear	876	Nm
	Required torque to lock the wheel	
Front	1908	Nm
Rear	350	Nm
	Torque balance	
Front	7	%
Rear	150	%

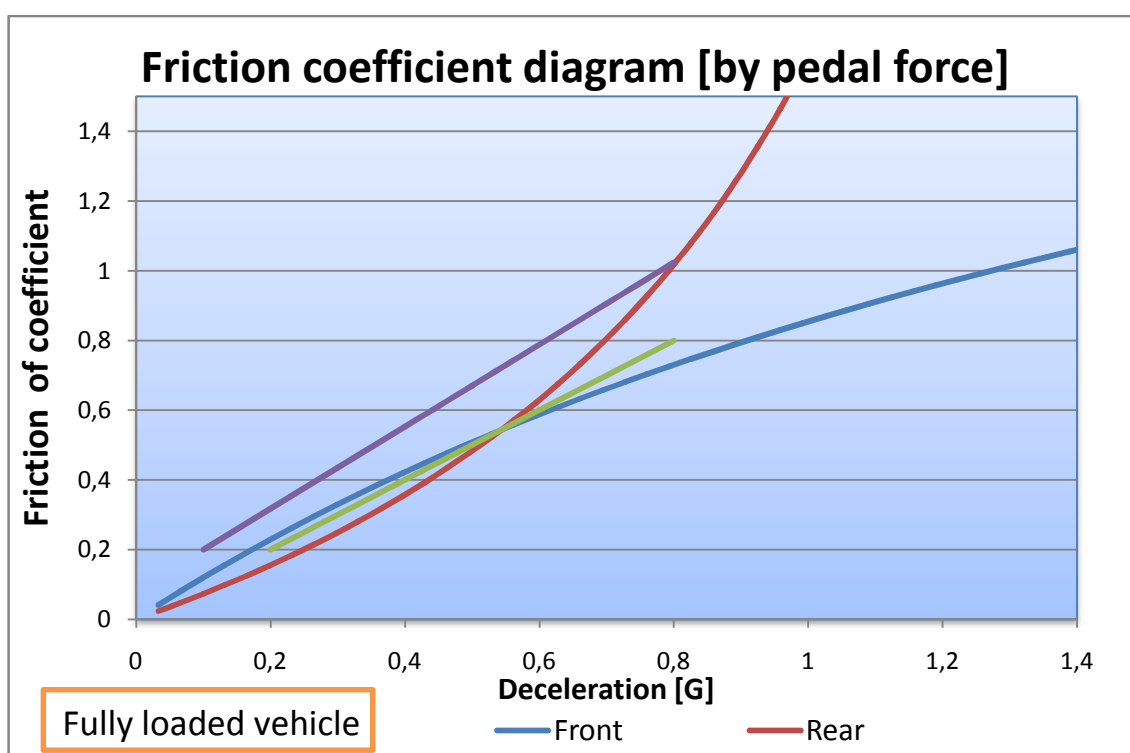
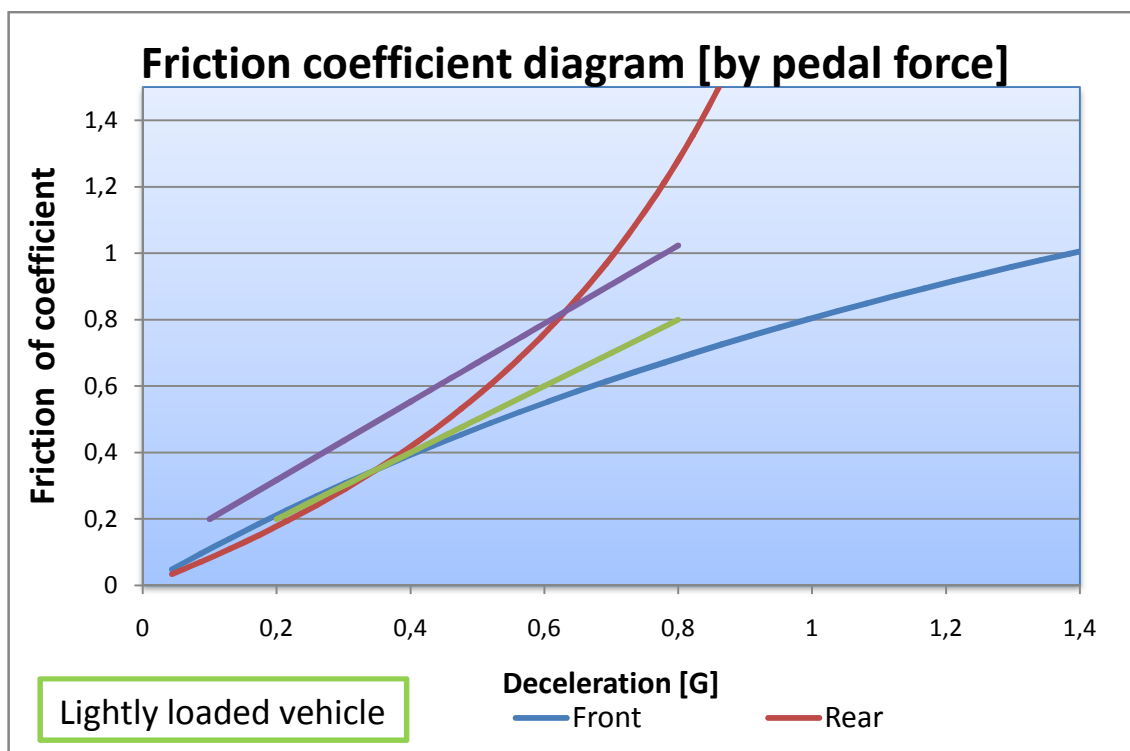
Maximum longitudinal
G's
1,23

BRAKING ANALYSIS WITH FULLY LOADED VEHICLE

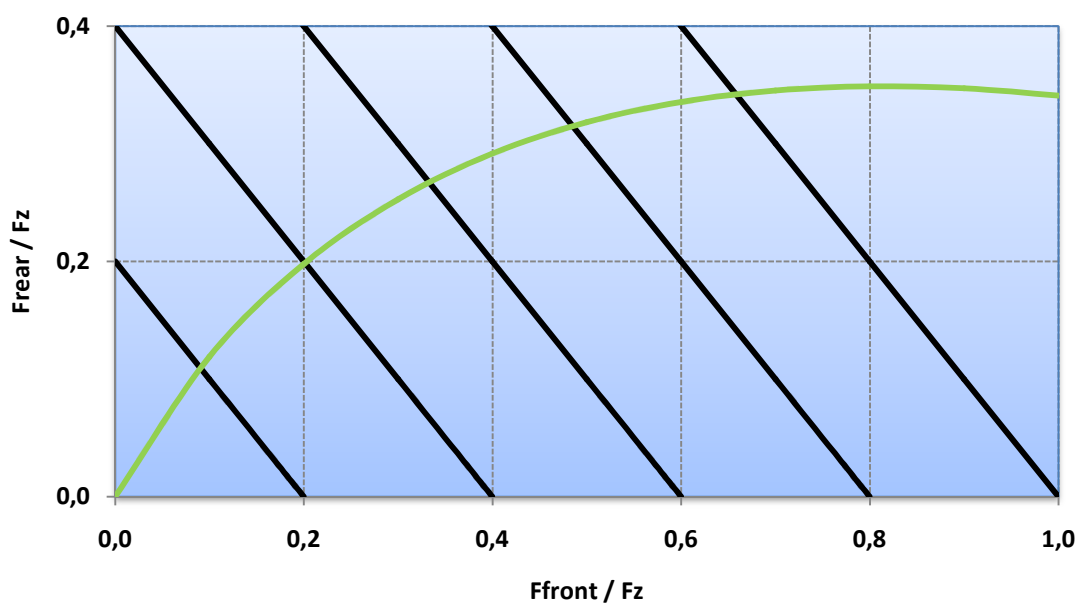
Tire / road $\mu =$ **0,95**

	Generated torque from disc	
Front	2048	Nm
Rear	876	Nm
	Required torque to lock the wheel	
Front	2349	Nm
Rear	606	Nm
	Torque balance	
Front	-13	%
Rear	45	%

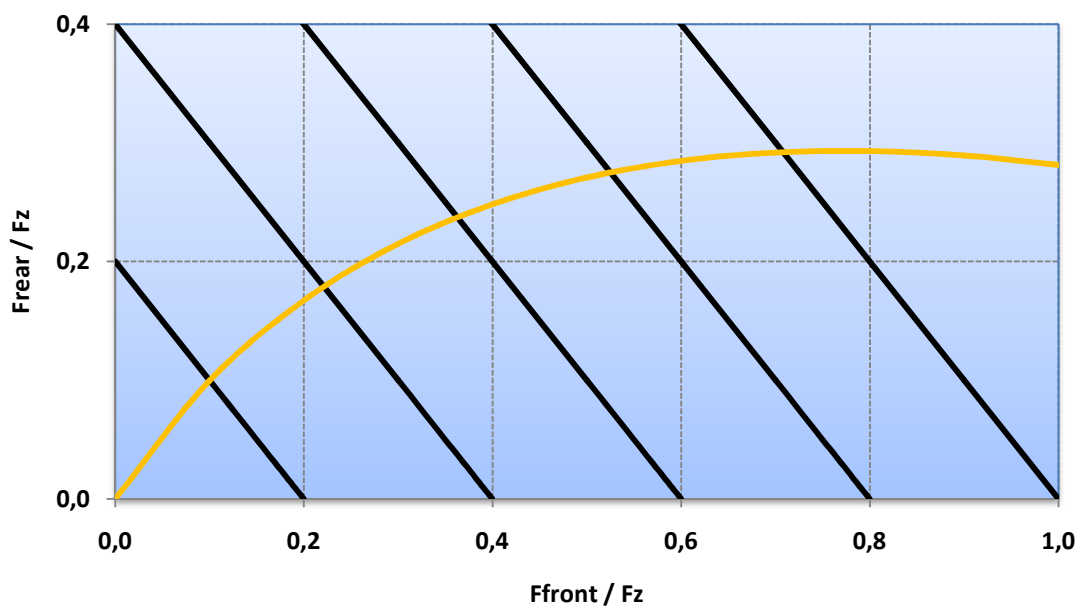
Maximum longitudinal
G's
0,94



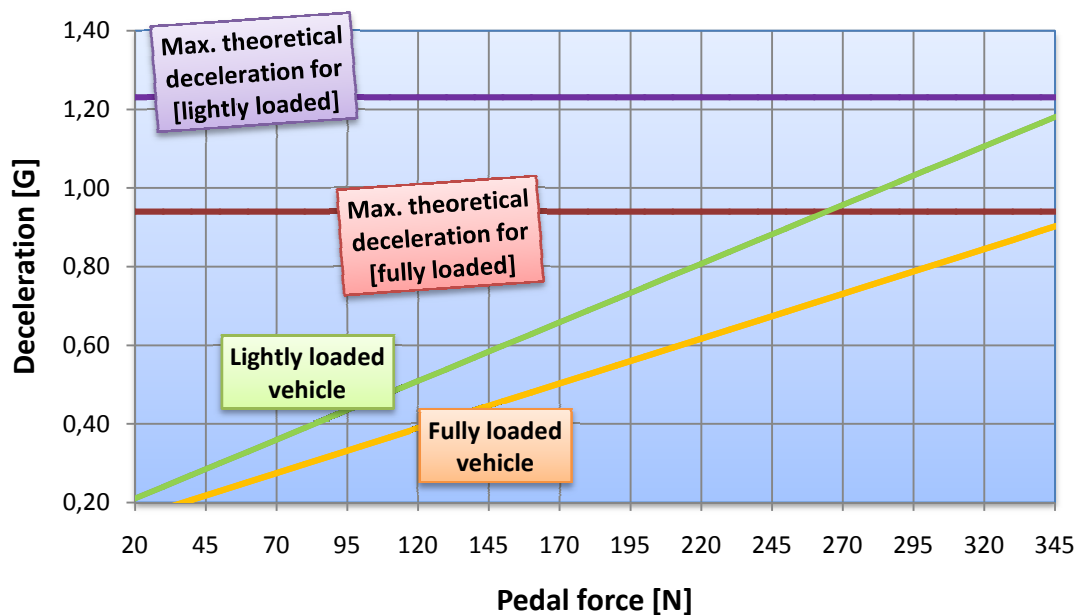
Ideal brake force distribution [lightly loaded]



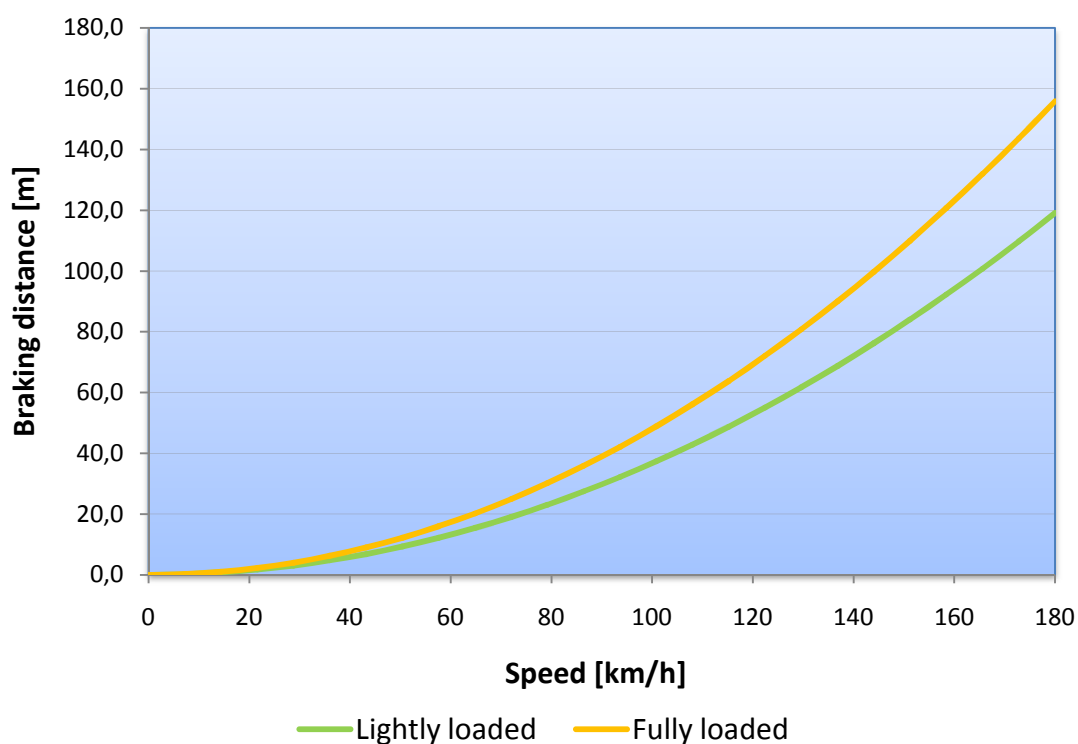
Ideal brake force distribution [fully loaded]



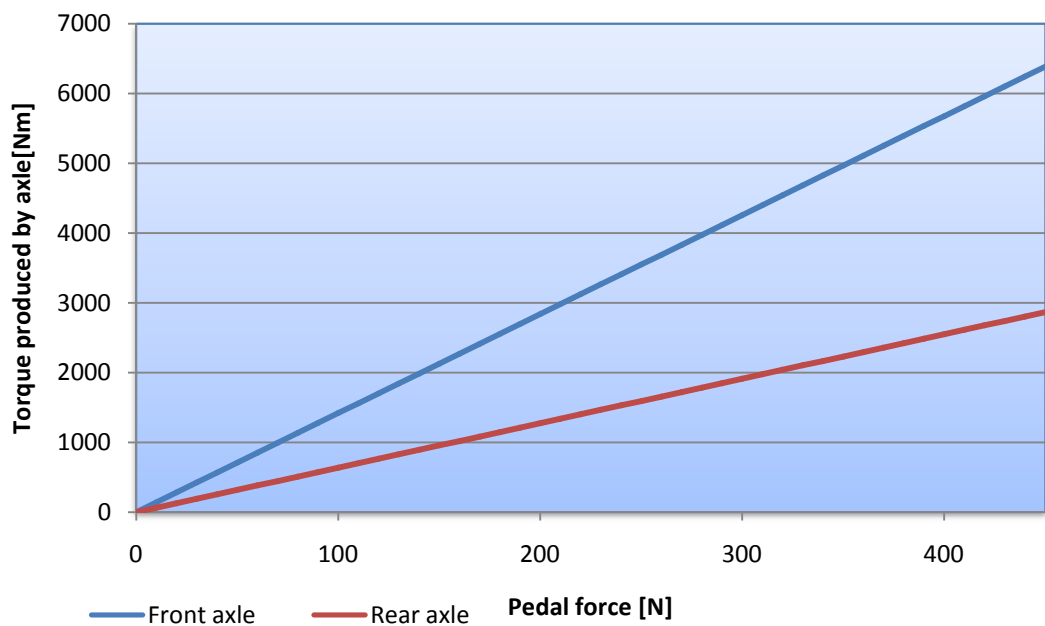
Vehicle theoretical deceleration as a function of pedal force



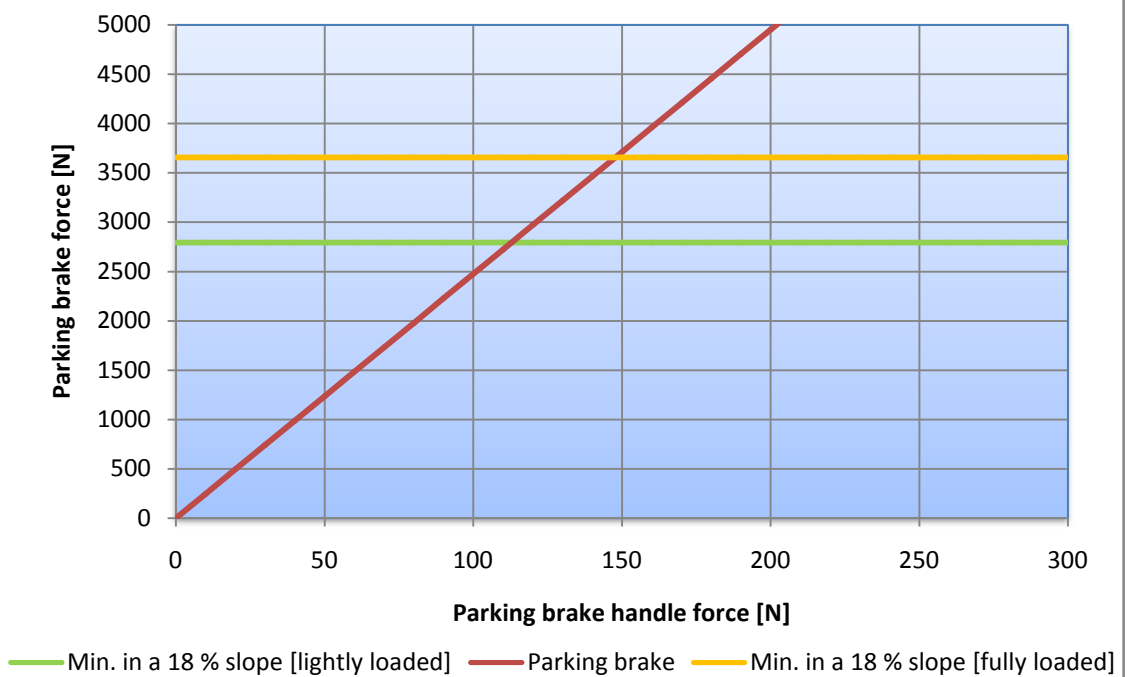
Braking distance as a function of vehicle speed

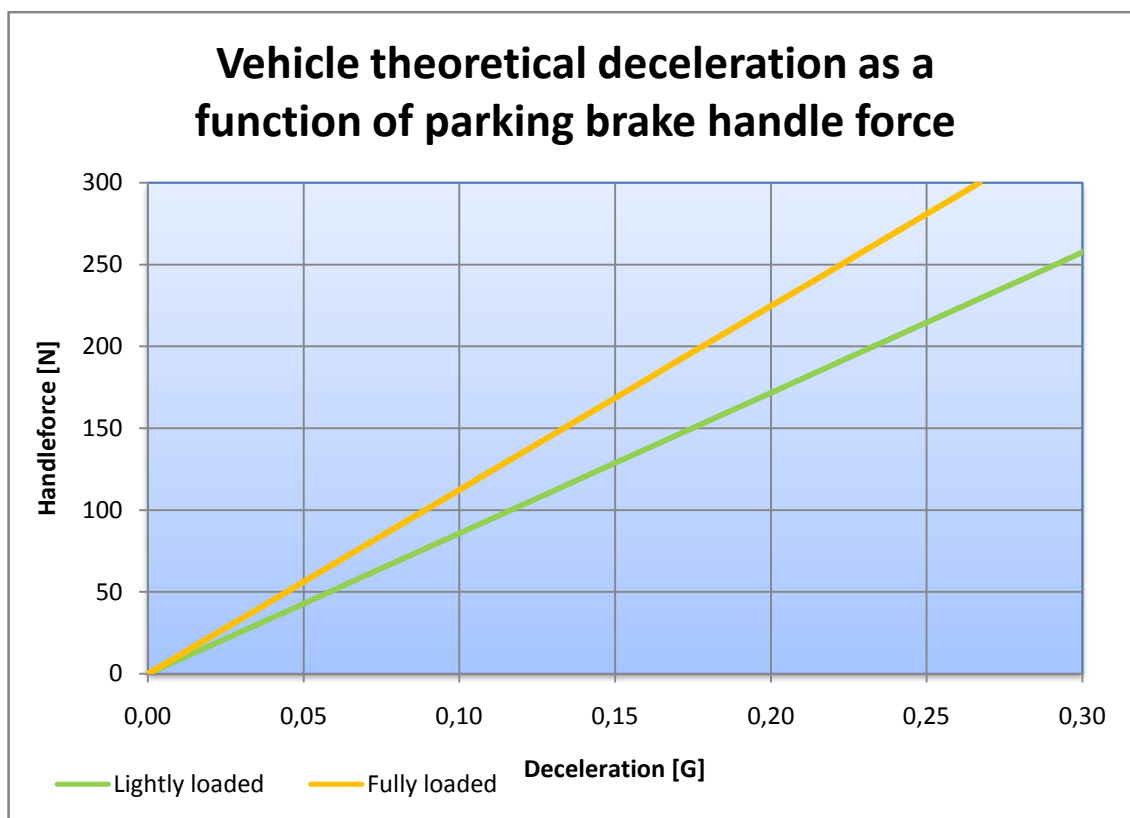


Generated braking torque as a function of pedal force



Force produced by parking brake as a function of handle force





Summary and comments:

Rear tire premature lock-up can occur while braking in high friction road without rear brake force distribution.

